



TUGAS AKHIR - TL 141584

**Simulasi Springback pada Laser Beam Bending dan
Rotary Draw Bending untuk Pipa AISI 304L**

ADNAN SYADIDAN
NRP. 02 51 12 4000 091

Dosen Pembimbing
Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

(Halaman sengaja dikosongkan)



FINAL PROJECT - TL 141584

**Springback Simulation on Laser Beam Bending and
Rotary Draw Bending for AISI 304L Pipes**

ADNAN SYADIDAN
NRP. 02 51 12 4000 091

Advisors
Mas Irfan Purbawanto Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

MATERIALS ENGINEERING DEPARTMENT
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY
SEPULUH NOPEMBER INSTITUTE OF TECHNOLOGY
SURABAYA
2017

(This page is intentionally left blank)

**Simulasi Springback pada Laser Beam Bending dan Rotary
Draw Bending untuk Pipa AISI 304L**

TUGAS AKHIR

**Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Metalurgi Manufaktur
Program Studi S-1 Departemen Teknik Material
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Oleh:

**Adnan Syadidan
NRP 02 51 12 40000 091**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Mas Irfan P. H, S.T.,M.Sc., Ph.D.....(Pembimbing)
2. Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc.....(Pembimbing)



(Halaman ini sengaja dikosongkan)

SIMULASI SPRINGBACK PADA LASER BEAM BENDING DAN ROTARY DRAW BENDING UNTUK PIPA AISI 304L

Nama Mahasiswa : Adnan Syadidan
NRP : 0251 12 40000 091
Departemen : Teknik Material
Pembimbing : Mas Irfan P. H., S.T., M.Sc., Ph.D
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

ABSTRAK

Proses bending tube pada dewasa ini telah mengalami banyak perkembangan. Dua metode diantaranya adalah rotary draw bending yang bersifat konvensional serta laser beam bending yang lebih modern. Selain itu, untuk mengoptimalkan proses tube bending diperlukan pengertian lebih mendalam terhadap fenomena springback, agar hasil yang didapatkan lebih presisi. Pada penelitian ini dilakukan analisis springback menggunakan Finite Element Method dengan bantuan software ANSYS 17.1. Simulasi dilakukan untuk mendapatkan hasil springback dari kedua metode yang nantinya akan dibandingkan. Penelitian pertama dilakukan dengan mensimulasikan proses laser beam bending hingga mencapai batas maksimum sudut bending yang dapat diterima. Selain itu, simulasi juga dilakukan pada metode rotary draw bending dengan parameter diameter dan ketebalan tube yang sama seperti sebelumnya namun, dengan sudut bending yang berbeda yaitu sebesar 60, 120, dan 180 yang akan digunakan sebagai data pendukung nilai springback. Dari simulasi didapatkan bahwa semakin tinggi laser power dan pass number pada laser beam bending, maka akan semakin tinggi springback yang dihasilkan namun, masih sangat kecil bila dibandingkan dengan rotary draw bending.

Kata kunci: springback, 304L, rotary draw bending, laser beam bending, metode elemen hingga

(Halaman sengaja dikosongkan)

SIMULATION OF SPRINGBACK IN LASER BEAM BENDING AND ROTARY DRAW BENDING FOR AISI 304L PIPE

Name of Student : Adnan Syadidan
NRP : 0251 12 40000 091
Department : Materials Engineering
Advisor : Mas Irfan P. H., S.T., M.Sc., Ph.D.
Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc

ABSTRACT

The bending tube process in today has undergone many developments. Two methods of which are conventional rotary draw bending and laser beam bending more modern. In addition, to optimize the tube bending process required a deeper understanding of the phenomenon of springback, so that the results obtained more precision. In this research done springback analysis using Finite Element Method with help of software ANSYS 17.1. Simulation is done to get springback result from both method which will be compared. The first research was done by simulating the laser beam bending process until it reached the maximum acceptable bending angle. In addition, simulations were also performed on the rotary draw bending method with the same diameter and tube thickness parameters as before, but with different bending angles of 60, 120, and 180 which will be used as springback support data. From the simulation it was found that the higher the laser power and the pass number in the laser beam bending, the higher the springback will be, but still very small when compared to the rotary draw bending.

Keywords: springback, 304L, rotary draw bending, laser beam bending, finite element method

(This page is intentionally left blank)

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah Subhanahu Wa Ta'ala atas segala berkat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul ***“Simulasi Springback pada Laser Beam Bending dan Rotary Draw Bending untuk Pipa AISI 304L”***

Penyusunan laporan ini merupakan salah satu tugas yang harus diselesaikan untuk meraih gelar Sarjana Teknik dan memenuhi mata kuliah Tugas Akhir.

Pada kesempatan ini penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua, kakak, istri, serta seluruh keluarga yang telah memberikan doa, semangat dan nasihat yang sangat bermanfaat.
2. Bapak Dr. Agung Purniawan, S.T., M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI – ITS.
3. Bapak Mas Irfan P. Hidayat, S.T., M.Sc., Ph.D dan Bapak Wikan Jatimurti, S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan, fasilitas dan motivasi.
4. Bapak Ir. Rochman Rochiem, M.Sc selaku dosen wali yang telah memberikan segala pengarahan selama masa perkuliahan.
5. Seluruh dosen dan karyawan Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
6. Teman-teman Teknik Material dan Metalurgi angkatan 2012 dan keluarga MT 14 yang telah memberikan dukungan dan saran. Juga Veteran MT 14, sebagai saudara seperjuangan.
7. Kota Surabaya, Mas dan Mbak, adik-adik, teman-teman di luar jurusan, serta orang-orang luar biasa yang saya temui di Surabaya, yang telah menemani,

memberikan cerita dan menjadi panutan pengalaman selama saya tinggal di Surabaya; serta

8. Semua pihak yang tidak bisa disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari adanya keterbatasan di dalam penyusunan laporan tugas akhir ini. Besar harapan penulis akan saran, dan kritik yang sifatnya membangun. Selanjutnya semoga tulisan ini dapat bermanfaat.

Surabaya, Januari 2018

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR JUDUL	i
TITLE.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN.....	v
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI.....	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL.....	xix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Perumusan Masalah	2
1.3. Batasan Penelitian.....	2
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1. Penelitian Sebelumnya.....	5
2.1.1. Penelitian Efek Springback pada Proses Laser Beam Bending.....	5
2.1.2. Penelitian Efek Springback pada Proses Rotary Draw Bending.....	7
2.2. Laser Beam Forming	12
2.3. Rotary Draw Bending	15
2.4. Springback	16
2.5. Metode Elemen Hingga	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1. Metode Penelitian	19
3.2. Spesifikasi Material dan Parameter	20
3.2.1. Material Tube.....	20
3.2.2. Geometri Tube	20
3.2.3. Rotary Draw Bending	20
3.2.4. Parameter Laser Beam Bending.....	22
3.3. Peralatan	22

3.4. Proses Penelitian	23
3.4.1. Pemodelan Pipa.....	23
3.4.2. Meshing.....	24
3.4.3. Tipe Pembebanan	24
3.4.4. Tipe Analisa	25
BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN	
4.1. Analisa Data.....	27
4.1.1. Analisa Laser Beam Bending	29
4.1.2. Analisa Rotary Draw Bending	56
4.2. Pembahasan	62
4.2.1. Pembahasan Laser Beam Bending	62
4.2.2. Perbandingan Hasil <i>Laser Beam Bending</i> dengan <i>Rotary Draw Bending</i>	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	
5.1. Kesimpulan	67
5.2. Saran	67
DAFTAR PUSTAKA	xxi
BIODATA PENULIS	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perbandingan Hasil <i>Springback</i> pada Lembaran Titanium dan Alumunium dengan <i>Laser Power</i> (Gisario, 2016) ..5	5
Gambar 2.2 Distribusi <i>Tangential Stress</i> Dalam Proses <i>Bending</i> (Zhao, 2009).....8	8
Gambar 2.3 Distribusi Tegangan Tangensial pada 3 Metode Berbeda (Xue, 2014)9	9
Gambar 2.4 Perbandingan Bentuk Akhir Setelah <i>Springback</i> Antara Eksperimen dengan Simulasi Untuk 3 <i>Hardening Laws</i> Dengan 2 <i>Yield Function</i> (Kim, 2006)10	10
Gambar 2.5 Variasi Sudut <i>Springback</i> (Jiang, 2010)11	11
Gambar 2.6 Skema Proses <i>Laser Beam Forming</i> (Hao, 2003) ..13	13
Gambar 2.7 Proses <i>Laser Beam Forming</i> (Akinlabi, 2012)14	14
Gambar 2.8 <i>Rotary Draw Bending</i> (Thorat, 2015).....15	15
Gambar 2.9 Kurva Perbandingan Profil Benda Kerja Saat <i>Bending</i> , <i>Over-Bending</i> , dan <i>Springback</i> (Gisario, 2016).....17	17
Gambar 2.10 Proses Pengerjaan Pada MEH.....18	18
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian19	19
Gambar 3.2 Desain <i>Laser Beam Bending</i>21	21
Gambar 3.3 Desain <i>Rotary Draw Bending</i>22	22
Gambar 3.4 Diagram Alir Pemodelan Menggunakan Metode Elemen Hingga.....23	23
Gambar 4.1 <i>Displacement 900 W 2 Pass</i> a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>29	29
Gambar 4.2 <i>Von Mises Stress</i> untuk 900 W dengan 2 <i>Pass</i> pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>30	30
Gambar 4.3 Gradiasi Temperatur untuk 900 W dengan 2 <i>Pass</i> pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>31	31
Gambar 4.4 <i>Displacement 900 W 3 Pass</i> a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>32	32
Gambar 4.5 <i>Von Mises Stress</i> untuk 900 W dengan 3 <i>Pass</i> pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>33	33
Gambar 4.6 Gradiasi Temperatur untuk 900 W dengan 3 <i>Pass</i> pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>34	34

Gambar 4.7 <i>Displacement</i> 900 W 4 Pass a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	35
Gambar 4.8 <i>Von Mises Stress</i> untuk 900 W dengan 4 Pass pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	36
Gambar 4.9 <i>Gradiasi Temperatur</i> untuk 900 W dengan 4 Pass pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	37
Gambar 4.10 <i>Displacement</i> 1200 W 2 Pass a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	38
Gambar 4.11 <i>Von Mises Stress</i> untuk 1200 W dengan 2 Pass pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	39
Gambar 4.12 <i>Gradiasi Temperatur</i> untuk 1200 W dengan 2 Pass pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	40
Gambar 4.13 <i>Displacement</i> 1200 W 3 Pass a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	41
Gambar 4.14 <i>Von Mises Stress</i> untuk 1200 W dengan 3 Pass pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	42
Gambar 4.15 <i>Gradiasi Temperatur</i> untuk 1200 W dengan 3 Pass pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	43
Gambar 4.16 <i>Displacement</i> 1200 W 4 Pass a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	44
Gambar 4.17 <i>Von Mises Stress</i> untuk 1200 W dengan 4 Pass pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	45
Gambar 4.18 <i>Gradiasi Temperatur</i> untuk 1200 W dengan 4 Pass pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	46
Gambar 4.19 <i>Displacement</i> 1500 W 2 Pass a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	47
Gambar 4.20 <i>Von Mises Stress</i> untuk 1500 W dengan 2 Pass pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	48
Gambar 4.21 <i>Gradiasi Temperatur</i> untuk 1500 W dengan 2 Pass pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	49
Gambar 4.22 <i>Displacement</i> 1500 W 3 Pass a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	50
Gambar 4.23 <i>Von Mises Stress</i> untuk 1500 W dengan 3 Pass pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	51

Gambar 4.24 Gradiasi Temperatur untuk 1500 W dengan 3 <i>Pass</i> pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	52
Gambar 4.25 <i>Displacement</i> 1500 W 4 <i>Pass</i> a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	53
Gambar 4.26 <i>Von Mises Stress</i> untuk 1500 W dengan 4 <i>Pass</i> pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	54
Gambar 4.27 Gradiasi Temperatur untuk 1500 W dengan 4 <i>Pass</i> pada a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	55
Gambar 4.28 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> dengan Sudut 60°	56
Gambar 4.29 <i>Von Mises Stress</i> pada Sudut 60° dengan Kondisi a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	57
Gambar 4.30 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> dengan Sudut 120°	58
Gambar 4.31 <i>Von Mises Stress</i> Sudut 120° dengan Kondisi a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	59
Gambar 4.32 Hasil Simulasi Sudut <i>Springback</i> dengan Sudut 180°	60
Gambar 4.33 <i>Von Mises Stress</i> Sudut 180° dengan Kondisi a) <i>Loading</i> b) <i>Unloading</i>	61
Gambar 4.34 Grafik Perbandingan Hasil Sudut <i>Bending</i> untuk Setiap <i>Laser Power</i> dan <i>Pass Number</i>	62
Gambar 4.35 Grafik Perbandingan Hasil <i>Springback</i> untuk Setiap <i>Laser Power</i> dan <i>Pass Number</i>	63

(Halaman sengaja dikosongkan)

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Parameter Tube Bending (Xue, 2014)	8
Tabel 2.2 <i>Springback</i> Hasil Simulasi dan Perhitungan Rumus (Iman, 2016)	12
Tabel 3.1 Standar Komposisi Kimia AISI 304L	20
Tabel 3.2 Properti Material dari AISI 304L	20
Tabel 3.3 Parameter Laser Bending	21
Tabel 3.4 Parameter <i>Rotary Draw Bending</i>	22
Tabel 3.5 Variasi Pembebanan pada Percobaan	25
Tabel 3.6 Perbandingan Metode Proses Penelitian	26
Tabel 4.1 Perbandingan Kemampuan Sudut <i>Bending</i> Penelitian pada Metode <i>Laser Beam Bending</i> dan <i>Rotary Draw Bending</i> ..	64
Tabel 4.2 Perbandingan Hasil <i>Springback</i> Penelitian pada Metode <i>Laser Beam Bending</i> dan <i>Rotary Draw Bending</i>	65
Tabel 4.3 Perbandingan Energi pada Kondisi <i>Loading</i>	66
Tabel 4.4 Perbandingan Energi pada Kondisi <i>Unloading</i>	66

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Tube bending merupakan hal yang sangat penting dalam manufaktur pada boiler, mesin, *heat exchanger*, pendingin ruangan, dan pipa maupun *tube*. *Tubes* dapat dibengkokkan secara mekanis baik dalam keadaan panas maupun dingin, walaupun proses *bending* lebih banyak digunakan dalam keadaan dingin. *Cold bending* lebih efisien dan menghasilkan produk yang lebih *rigid*, sedangkan *hot bending* lebih sesuai untuk sudut *bending* yang lebih kecil atau diameter yang lebih besar. (Yao, 2001)

Springback merupakan fenomena *strain recovery* yang diakibatkan pelepasan tegangan sisa pada lembaran logam saat dilepaskan dari cetakan. Dalam rangka memprediksi besar nilai dari *springback*, simulasi akurat dari tegangan pada *dead point* dan perilaku tanpa beban dari material sangat dibutuhkan. (Sumikawa, 2017)

Penelitian *springback* secara teoritis dan eksperimental pada *rotary draw* telah banyak dilakukan. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa sudut *springback* berbanding lurus dengan sudut *bending* pada sudut *bending* yang besar, dan kontrol *bend-rebend* biasanya mengandung data *springback* dan penyeimbangannya. Metode dari kontrol proses dikembangkan untuk mengoptimalkan strategi kontrol secara keseluruhan. Prediksi *springback* berdasarkan eksperimen dianggap cukup terpercaya, mengandung data *springback* yang hanya berlaku pada tube bending dengan kondisi yang sama. (Yang, 2012)

Secara umum, metode *laser forming* memiliki banyak keuntungan dibandingkan dengan proses bending konvensional seperti, proses *rapid* dan *bending* tanpa efek *springback*. Namun, ada beberapa aplikasi spesifik di mana *laser forming* terbukti lebih berguna dan efisien. Aplikasi umum dari area *laser forming* adalah koreksi dari sudut bengkok dibandingkan metode konvensional. (Narendra, 2007)

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan penjabaran latar belakang di atas, dapat ditarik beberapa masalah dalam penelitian ini yaitu :

1. Bagaimana pengaruh *power laser* terhadap *springback* yang dihasilkan pada pemodelan *tube bending* dengan material SS304L pada simulasi proses *laser bending*?
2. Bagaimana pengaruh jumlah *pass* terhadap *springback* yang dihasilkan pada pemodelan *tube bending* dengan material SS304L pada simulasi proses *laser bending*?
3. Bagaimana perbandingan hasil *springback* yang dihasilkan pada pemodelan *tube bending* dengan material SS304L pada simulasi proses *rotary draw bending* dengan *laser*?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan yang diangkat dalam penelitian ini adalah :

1. Menganalisa pengaruh *power laser* terhadap *springback* yang dihasilkan pada pemodelan *tube bending* dengan material SS304L pada simulasi proses *laser bending*.
2. Menganalisa pengaruh jumlah *pass* terhadap *springback* yang dihasilkan pada pemodelan *tube bending* dengan material SS304L pada simulasi proses *laser bending*.
3. Menganalisa perbandingan hasil *springback* yang dihasilkan pada pemodelan *tube bending* dengan material SS304L pada simulasi proses *rotary draw bending* dengan *laser*.

1.4. Batasan Penelitian

Untuk mendapatkan hasil perhitungan yang sesuai dengan referensi yang ada serta agar tidak menyimpang dari

permasalahan yang akan ditinjau, maka terdapat beberapa batasan masalah yang perlu diperhitungkan yaitu :

1. Diasumsikan bahwa material isotropik dan homogen.
2. Diasumsikan tidak terjadi proses *melting* selama *laser forming*.
3. Perpindahan dari benda kerja ke clamp sangat kecil sehingga diabaikan.
4. Fenomena panas akibat perubahan fasa diabaikan.
5. Panas yang timbul akibat *strain energy* oleh deformasi plastis diabaikan karena sangat kecil dibandingkan input panas dari sinar laser.
6. Efek *Bauschinger* diabaikan.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai referensi pengembangan dalam proses manufaktur lanjut (*advanced manufacturing process*) dalam dunia industri dan sebagai referensi untuk peneliti-peneliti berikutnya dalam membuat prototipe dari metode ini.

(Halaman sengaja dikosongkan)

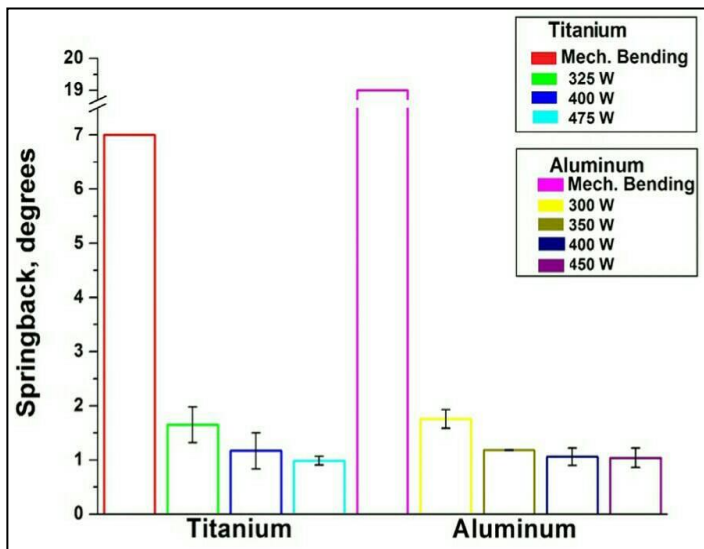
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Sebelumnya

2.1.1. Penelitian Efek *Springback* pada Proses *Laser Bending*

Gisario (2016) melakukan percobaan mengenai evaluasi efek *springback*, yang diukur secara *offline* menggunakan mesin pengukur koordinat, setelah melakukan *bending* pada lembaran titanium dengan mengatur *scanning speed* laser pada 10 mm/s , jumlah dari *pass* pada nilai 12, serta memvariasikan daya laser (325, 400 dan 475 W). Maka didapatkan hasil analisa *springback* setelah melakukan *bending* yang dijelaskan pada Gambar 2.1 berikut,



Gambar 2.1 Perbandingan Hasil *Springback* pada Lembaran Titanium dan Alumunium dengan *Laser Power* (Gisario, 2016)

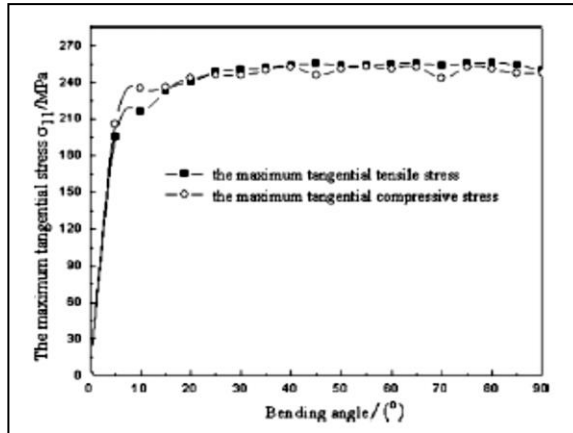
Springback juga dapat dihitung melalui perhitungan *bending* pada lembaran logam hingga *stroke limit* dari *costum-built bending device*, menggunakan piston dengan *high contact pressure* tanpa memanaskan zona *bending* menggunakan irradiasi laser (hanya pada proses *bending* konvensional). *Springback* pada lembaran titanium yang telah dibengkokkan dengan alat proses *convensional forming* memiliki nilai lebih besar dari 7°. Sedangkan pada alumunium didapat hasil *springback* yang sangat tinggi hingga 31° dengan menggunakan aplikasi *contact pressure* itu sendiri. Namun, hasil ini sesuai dengan yang diharapkan karena titanium dan sebagian besar *lightweight alloys* memiliki *springback* yang tinggi karena ratio yang tinggi dari tegangan awal dengan modulus elastisitasnya. Proses *forming* dengan aplikasi simultan pada lembaran logam dari *contact pressure* menggunakan piston *pneumatic* dan pemanasan pada zona *bending* oleh irradiasi laser menghasilkan nilai *springback* yang sangat kecil. *Springback* secara progresif berkurang oleh meningkatnya *laser power*. Dengan nilai rata-rata sebesar 2%, saat *power* terendah diatur pada 375 dan 300W yang digunakan pada titanium dan alumunium. Nilai *springback* akan mendekati atau lebih rendah dari 1% ketika *laser power* diatur pada 400 dan 475W untuk titanium serta *laser power* 350W ke atas untuk alumunium. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, *bending* pada lembaran dengan daya sangat tinggi dan *high passes* dapat menghasilkan sudut *bending* sekitar 140° (sangat mendekati ambang batasnya). Oleh karena itu, *springback* secara substansial dapat diabaikan untuk kedua lembaran logam, sejauh ini bila, nilai *bending angle*-nya kurang dari 1%. Penurunan *springback* di dalam gaya eksternal laser yang membantu proses *bending* dapat diartikan dalam keuntungan dari kenaikan temperature yang dihasilkan pada *bent zone* oleh irradiasi laser. Pemanasan logam dapat menurunkan nilai *initial yield strength*, meningkatkan *formability*, serta mengurangi kebutuhan dari *contact pressure* yang dibutuhkan untuk menghasilkan sudut *bending* yang tinggi. Lebih jauh, strukturmikro dari logam tersebut sangat sensitive

pada pemanasan dan pengolahan, bahkan pada temperature kamar. Pemanasan logam memungkinkan kenaikan *formability*-nya. Faktanya, pemanasan diharapkan dapat menghasilkan perubahan yang signifikan dari strukturmikro material, dapat memicu pembentukan butiran yang lebih sesuai untuk deformasi permanen. (Gisario, 2016)

2.1.2. Penelitian Efek *Springback* pada Proses *Rotary Draw Bending*

Zhu (2012) melakukan penelitian berdasarkan percobaan dari Eggersten dan Mattiason, bahwa ketidaksesuaian pada prediksi *springback* terbentuk dari perbedaan *yield criteria* yang diakibatkan refleksi pada potongan *sheet strips* dari arah yang melintang, di mana ketidaksesuaian ini hanya terjadi sedikit pada arah *rolling*. Adapun fungsi dari *yield* adalah memberikan efek untuk menurunkan magnitude dari *springback* dibandingkan *hardening rule*. Ketidaksesuaian yang terjadi diakibatkan oleh perbedaan *hardening rule* yang sangat jelas terlihat bila dibandingkan dengan ketidaksesuaian akibat perbedaan *yield criteria*. Oleh karena itu, *hardening rule* memiliki akibat yang besar pada *bending springback*.

Zhao (2009) menemukan fakta bahwa nilai dari tegangan tangensial meningkat secara tajam saat *bending angle*-nya ditingkatkan dari 0 hingga 100. Tegangan tangensial berfluktuasi dengan amplitudo kecil saat *bending angle* lebih besar dari 100, serta getaran dari tegangan tekan tangensial akan lebih jelas terlihat dibandingkan dengan tegangan tarik tangensial. Alasan utamanya adalah bahwa deformasi elastis dihasilkan dalam proses *initial bending*. Dengan kemajuan proses *bending*, *tube* mengalami perubahan dari tahap deformasi elastis menjadi tahap deformasi plastis tetap. Fluktuasi dari tegangan tangensial pada tahap deformasi plastis tetap ini dihasilkan dari deformasi kontak tak tetap. Hasil distribusi *tangential stress*-nya ditunjukkan pada Gambar 2.2 berikut,



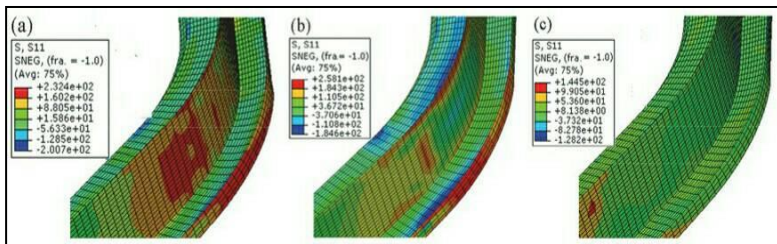
Gambar 2.2 Distribusi *Tangential Stress* dalam Proses *Bending* (Zhao, 2009)

Xue (2014) melakukan analisis tentang *twist springback* dari *asymmetric thin-walled tube* dengan proses *rotary draw bending*. Material yang digunakan adalah paduan aluminium (AA6060-T4) dengan ketebalan 2 mm, Modulus Young $E = 51$ GPa, dan Poisson's ratio 0.33. Parameter *tube bending* dapat dilihat pada Tabel 2.1 di bawah ini

Tabel 2.1 Parameter *Tube Bending* (Xue, 2014)

No.	Parameters	Value
1	Bending velocity, $\omega/(rad/s)$	0.523
2	Bend angle, $\theta/(^{\circ})$	45
3	Speed of Mandrel retracted, $V_m(mm/s)$	100
4	Minimum bend radius, $R/(mm)$	116
5	Speed of pressure die, $V_p(mm/s)$	50.5
6	Clearances between tube and tools, (mm)	0.1
7	Booster, $P_b(MPa)$	0.3
8	Wiper die rake angle, $\delta/(^{\circ})$	1
9	Mandrel flexible cores	5

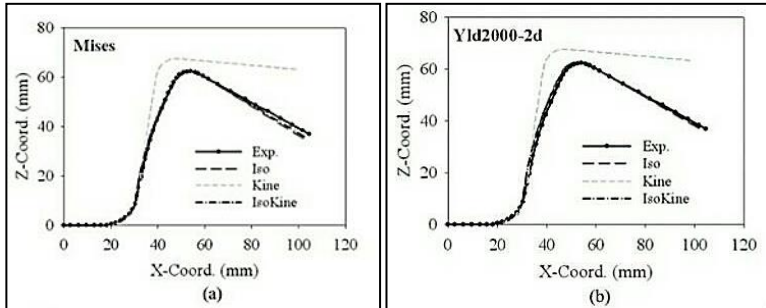
Untuk mendapatkan sumber dari *twist springback*, dilakukan analisa terhadap distribusi tegangan tangensial selama tahap *bending* yang berbeda-beda. Dapat dilihat bahwa tegangan tangensial pada zona tegangan *tension* perlahan-lahan dilepaskan selama proses berlangsung. Tegangan tangensial primer muncul di dalam proses *bending* yang pertama. Selama tarikan dari mandrel, tegangan tangensial pada bagian di dekat *rectangular section* mengalami penurunan, tetapi tetap tidak berubah di dalam bagian *open angle section*. Hal ini dikarenakan interior fleksibel dari mandrel tidak secara langsung melakukan kontak dengan bagian *open section*, *twisting*. Namun, hal itu mempengaruhi deformasi dari bagian *close section* seperti *longitudinal springback* dan distorsi *cross section*. Selain perubahan dari sudut *bending tube*, *springback* juga mempengaruhi *twist deformation*. Hal ini dijelaskan dalam Gambar 2.3 di bawah



Gambar 2.3 Distribusi Tegangan Tangensial pada 3 Metode Berbeda: (a) *Bending*; (b) Tarikan Mandrel; (c) *Springback* (Xue, 2014)

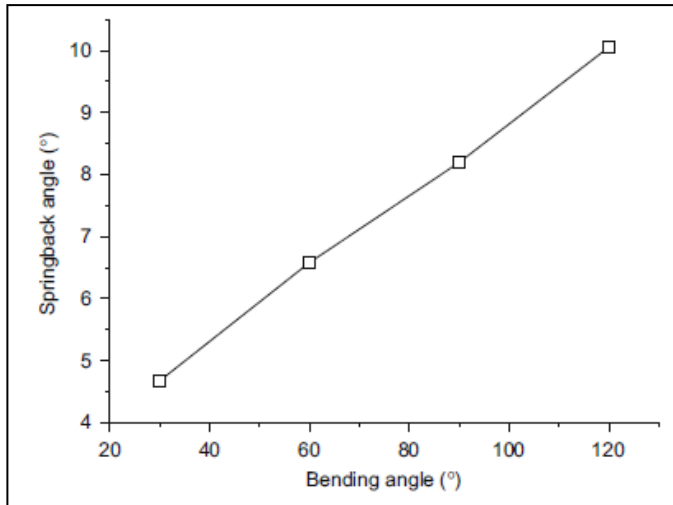
Kim (2006) mengatakan bahwa ketika *kinetic hardening* digunakan, jumlah dari *springback* dapat diabaikan, menunjukkan bahwa *kinetic hardening* murni tidak cukup untuk memprediksi *springback*. Adapun efek dari *yield function*, sudut *springback* dalam daerah flens (θ_3) untuk Yld2000-2d lebih mendekati hasil eksperimen dibandingkan dengan *Mises surface*. Namun, *springback* untuk Yld2000-2d dan untuk *Mises surface* memiliki kesamaan satu sama lain untuk parameter *springback* lainnya.

Dapat disimpulkan bahwa jumlah dari *springback* adalah sebanding dengan rasio *yield stress* dengan modulus Young serta ketebalan logam. Perbandingan bentuk akhir setelah *springback* antara eksperimen dan simulasi dijelaskan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Perbandingan Bentuk Akhir Setelah *Springback* Antara Eksperimen dengan Simulasi Untuk 3 *Hardening Laws* dengan 2 *Yield Function*: (a) Mises; (b) Yld2000-2d (Kim, 2006)

Lalu Jiang (2010) melakukan penelitian mengenai *bending* pada *titanium alloy tube* dengan menggunakan metode elemen hingga pada *software* ABAQUS. Dapat disimpulkan bahwa *springback* substansial muncul selama proses *bending tube* TA18M dibandingkan selama *bending* dari *stainless steel* serta *tube* paduan aluminium (seperti SS304, 5052O, dan 6061O). Dengan kenaikan *bending angle*, sudut *springback* dari *tube* TA18M juga meningkat secara linear. Dengan demikian, *springback* tidak dapat diabaikan dalam analisa *bending tube* TA18M. Hasil variasi *springback* sesuai dengan variasi sudut *bending*, tampak pada Gambar 2.5 berikut



Gambar 2.5 Variasi Sudut *Springback* (Jiang, 2010)

Sedangkan Iman (2016) melakukan analisa *springback* pada variasi geometri tube yaitu 4x4 cm, 4x2 cm, dan 5x3 cm serta ketebalan 1 mm, 2 mm, dan 3 mm, dengan sudut bending yang digunakan sebesar 30°, 60°, 90°, 120° dan 180°. Pemodelan yang dilakukan adalah pemodelan pengaruh variasi ukuran sisi tube dan besar sudut bending terhadap besar *springback* pada proses *rotary draw bending*. Hasil yang diamati yaitu besarnya *springback*, yaitu selisih antara sudut akhir yang dihasilkan ketika pelepasan alat (*remove tooling*) dan sudut bending yang diinginkan, serta besarnya *Von Mises stress* pada proses bending, atau besarnya stress yang dihasilkan selama proses bending baik sebelum dan sesudah *remove tooling*. *Displacement* yang dilakukan pada pemodelan menunjukkan terjadinya *springback*. Perbandingan *springback* hasil eksperimen dengan perhitungan ditunjukkan pada Tabel 2.2 di bawah ini,

Table 2.2 *Springback* Hasil Simulasi dan Perhitungan Rumus
(Iman, 2016)

No	Sudut bending (°)	Simulasi (°)	Perhitungan Rumus (°)
1	30	2.164	1.065
2	60	3.058	2.130
3	90	3.930	3.195
4	120	4.709	4.260
5	180	6.262	6.390

Hasil yang didapat dari simulasi, kemudian dibandingkan dengan rumus perhitungan. Rumus perhitungan yang digunakan yaitu,

$$\theta_u = \theta_l \left(1 - \frac{R_l M_l}{EI} \right) \dots\dots\dots(2.1)$$

dimana, θ_u = Sudut akhir, θ_l = Sudut bending, R = Jarak bending, M = Momen bending, E = Modulus Elastisitas, dan I = Momen Inersia tube, dengan momen bending sebesar,

$$M_l = Z \sigma_s \dots\dots\dots(2.2)$$

dimana, Z = Section Modulus, dan σ_s = Yield Stress, dan nilai Section Modulus dihitung dengan,

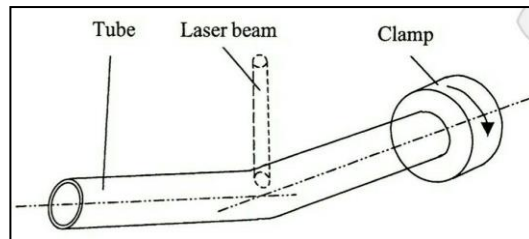
$$Z = \frac{bh^2}{4} - (b - 2t) \left(\frac{h}{2} - t \right)^2 \dots\dots\dots(2.3)$$

(Iman, 2016)

2.2. *Laser Beam Forming*

Menurut Hao, *laser forming* merupakan teknik *forming* dengan proses bebas *springback* dan juga tanpa kontak yang dalam dekade belakangan telah banyak dilakukan penelitian tentangnya. Dibandingkan dengan mengaplikasikan gaya eksternal menggunakan *tools forming*, *laser forming* lebih disebabkan oleh deformasi plastis yang dihasilkan dari tegangan termal akibat pemanasan laser dan pendinginan yang cepat. Meskipun asal mula dari *laser forming* dapat ditelusuri dari metode *flame bending* yang telah ada sebelumnya, namun *laser*

forming memiliki teknik yang lebih mulus dan terkendali yang menawarkan banyak kemungkinan aplikasi unik. Berbagai kemungkinan aplikasi ini dihasilkan dari kontrol yang baik pada transfer energi, akurasi tingkat tinggi dan reproduktifitas, fleksibilitas yang tinggi, serta sifat tanpa kontak. Skema dari proses *laser beam forming* ini dapat digambarkan pada Gambar 2.6.

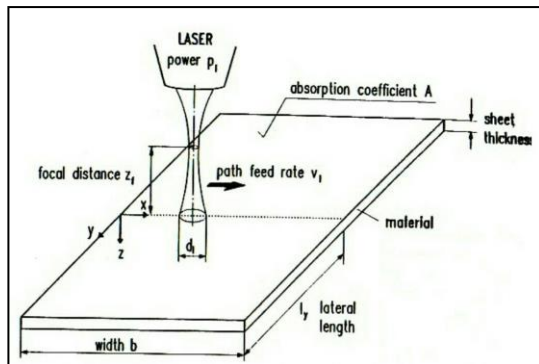


Gambar 2.6 Skema Proses *Laser Beam Forming* (Hao, 2003)

Ukuran dari sinar laser dipilih agar lebih besar dari nilai ketebalan *tube*. Dapat dihasilkan, *scanned region* dari *tube* dipanaskan secara homogen sesuai arah ketebalan, serta mengalami *compressive* deformasi plastis dan penebalan dinding akibat pembatasan termal oleh material sekitar. Pemendekan material dari *scanned region* di dalam arah aksial *tube* menyebabkan *tube* mengalami pembengkokkan ke arah sinar laser. (Hao, 2003)

Laser beam forming merupakan proses pembentukan nok kontak dan didasarkan pada proses *flame bending*. Proses ini dapat dianggap sebagai proses manufaktur yang fleksibel dengan potensial besar untuk *sheet metal forming*. Dapat diartikan juga sebagai proses pembentukan termo-mekanis yang memungkinkan komponen (lembaran logam, batang serta pipa) untuk dibentuk tanpa gaya eksternal dan tidak memerlukan penggunaan *dies* seperti yang ditemukan pada sebagian besar metode *forming* tradisional. Hal ini dapat dicapai dengan mengirradiasi permukaan material menggunakan sinar laser yang tidak fokus, sehingga menciptakan pemanasan lokal yang cepat serta diikuti oleh

pendinginan saat energi laser dipindahkan ke area lain yang berdekatan atau bahkan dihilangkan. Proses dari *laser beam forming* ini dijelaskan dalam Gambar 2.7 berikut ini,



Gambar 2.7 Proses *Laser Beam Forming* (Akinlabi, 2012)

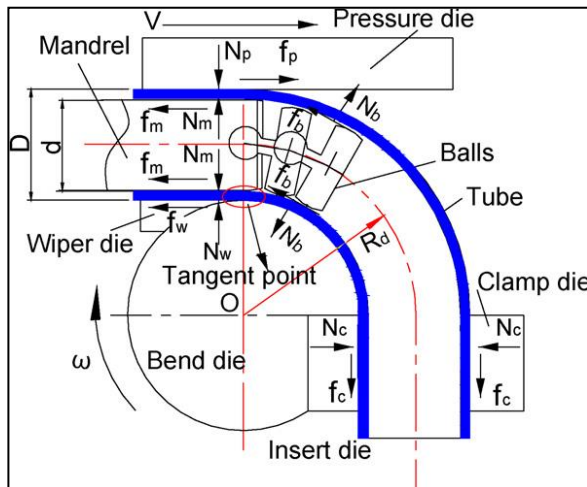
Sebagai konsekuensi dari proses pembentukan termal yang diinduksi, tidak ada *springback* yang muncul pada material setelah proses *laser forming* ini. Tiga proses utama yang sangat signifikan selama proses ini adalah parameter material yang meliputi nilai koefisien dari ekspansi termal, konduktifitas termal, *density* material, panas laten, parameter *mechanical elastic* dan *plastic* (modulus Young, *Poisson ratio*, kurva tegangan-regangan) dan juga tingkat dari absorpsi laser. Parameter dari laser termasuk nilai *laser power*, diameter sinar, *feed rate* serta panjang gelombang sinar yang bergantung pada tipe laser yang digunakan. Serta yang terakhir adalah parameter geometri dari sampel yang dibengkokkan termasuk diantaranya ketebalan dan panjang lembaran.

Keuntungan terbesar dari proses *laser beam forming* pada *flame bending* ini adalah kemampuannya untuk dapat dikendalikan. Dengan proses ini, dimungkinkan kendali yang akurat dari daya dan geometri dari sumber panas. Selain itu, dari perspektif pembentukan logam, didapat bahwa *springback* secara keseluruhan dapat dihilangkan. Gradient temperature

dikembangkan selama proses untuk memaksa material terekspansi secara tidak merata, yang dapat mengakibatkan tegangan termal yang tidak merata pula. Deformasi plastis dihasilkan saat tegangan termal melebihi nilai dari *yield point* material. (Akinlabi, 2012)

2.3. Rotary Draw Bending

Rotary draw bending merupakan proses fisik tri-nonlinier dengan efek kopling multifactor dan beberapa kecacatan seperti *local wrinkling*, *over thinning* (bahkan *crack*), dan distorsi *cross-section* dengan parameter *forming* yang tidak sesuai. Bila dibandingkan dengan proses *bending* yang lain, metode ini merupakan proses kontak dominan dalam *multi-die constraints* dengan menggunakan *bend die*, *clamp die*, *pressure die*, *wiper die*, serta mandrel (dengan *mandrel shank* dan bola fleksibel), seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Rotary Draw Bending (Thorat, 2015)

Hanya dengan penggunaan yang presisi dari alat-alat ini, memungkinkan kestabilan dan ketepatan dari deformasi *bending*

dapat dicapai dengan R_d/D , bebas *wrinkling*, derajat deformasi dari *wall thinning* dan *cross-section*. Gesekan dari berbagai *interfaces* alat memungkinkan untuk memberikan efek yang berbeda-beda dari perilaku deformasi *bending* metode ini. (Yang, 2011)

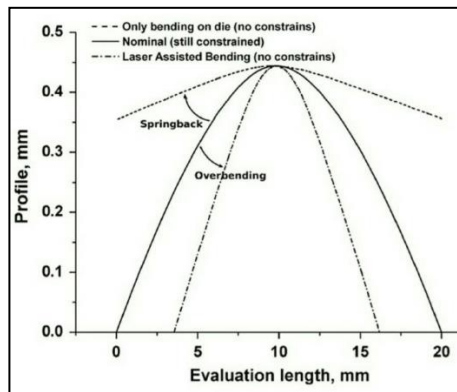
Rotary draw memiliki beberapa komponen penyusun. Pertama adalah *bend die*, yang merupakan komponen utama pada alat ini. *Tube* dijepit pada komponen ini kemudian ditarik mengelilinginya untuk menghasilkan bengkokkan. Kedua adalah *pressure die*, sebagai alat yang menahan *tube* pada *bend die* saat *pressure* diberikan oleh alat pada garis tangensial selama proses, untuk menciptakan titik *bending*. Selanjutnya adalah *wiper* yang seringkali terbuat dari blok solid untuk menjaga jarak antara *bend die* dengan garis singgung pada *tube*, berbentuk dua buah bagian sederhana. Adapun komponen yang menjepit *tube* dengan *bend die* untuk menahannya adalah *clamp die*, yang berputar bersamaan dengan *bend die* serta *tube*. (Thorat, 2015)

2.4. *Springback*

Springback adalah fenomena *strain recovery* yang disebabkan oleh pelepasan tegangan sisa pada lembaran logam saat pelepasan *die*. Untuk menentukan jumlah *springback*, maka simulasi tegangan yang akurat dilakukan di bawah *dead point* dan perilaku *unloading* material sangat penting. Sedangkan untuk prediksi tegangan, efek Bauschinger, yang merupakan fenomena pelunakan setelah *stress reversal*, dikenal sebagai perilaku kritis material, terutama saat *stress reversal* seperti *bending-unbending* terjadi pada lembaran logam selama *press forming*. (Sumikawa, 2017)

Gejala *springback*, yang tidak dikontrol dengan baik, dapat menyebabkan masalah serius pada bentuk akhir dari benda kerja, sehingga mengganggu kinerja proses. Fenomena *springback* merupakan hasil dari energi yang tersimpan di dalam benda kerja selama proses saat mengalami deformasi plastis dalam proses *bending*. Material yang dibengkokkan akan

dilepaskan pada saat akhir dari proses *bending*, lalu energi yang tersimpan di dalam material dapat segera mungkin terlepas. Hal ini mengakibatkan perubahan tidak terduga dari bentuk akhir benda kerja karena elastisitas residual tetap tersimpan di dalam material, yang dapat menyebabkan bentuk yang diinginkan serta toleransi dimensi tidak didapat. Gambar 2.9 di bawah ini dapat menjelaskan perbandingan profil benda kerja saat *bending*, *overbending*, serta setelah *springback*.

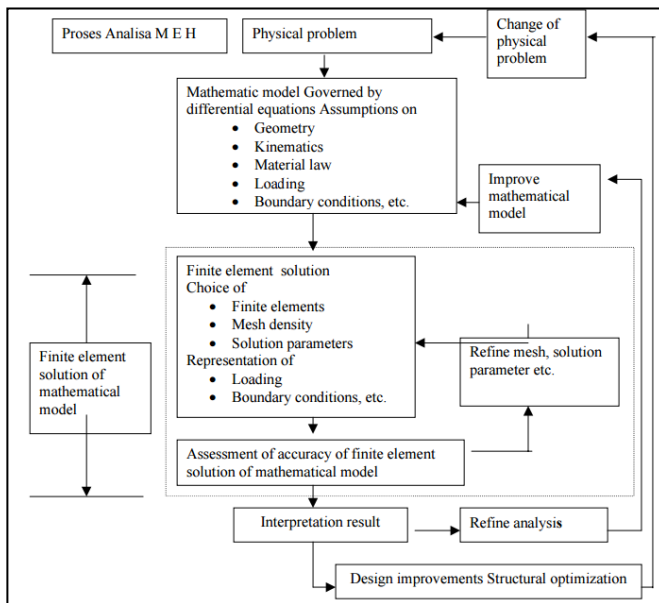


Gambar 2.9 Kurva Perbandingan Profil Benda Kerja Saat *Bending*, *Over-Bending*, dan *Springback* (Gisario, 2016)

Springback biasanya dihasilkan dari benda kerja yang *over-bending*. Benda kerja secara sengaja di-*over-bend* menggunakan profil *mold* yang di desain sedemikian rupa untuk memperhitungkan *springback*. Setelah alat dilepaskan pada saat proses akhir *bending*, benda kerja akan berusaha kembali ke bentuk asalnya sebagai efek dari deformasi yang dipaksakan, sehingga sesuai dengan spesifikasi geometri yang diinginkan. Sebagai alternative, *springback* dihadapi dengan *stretch bending* atau *coining*, merupakan sebuah proses pembentukan di mana *high stretch tensions* atau *contact pressure* diberikan untuk memaksa benda kerja agar sesuai dengan bentuk cetakan, sehingga menekan kemunculan *springback*. (Gisario, 2016)

2.5. Metode Elemen Hingga

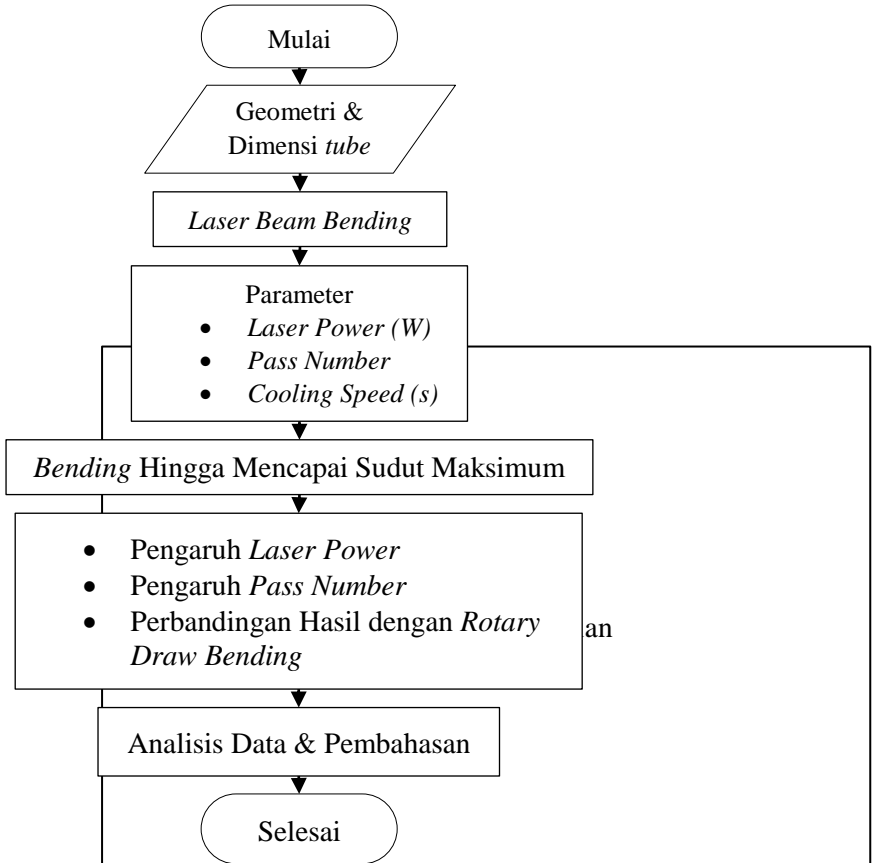
Metode elemen hingga merupakan metode numerik dengan basis komputasi untuk memecahkan persoalan pada bidang *engineering*. Geometri dibagi menjadi elemen-elemen yang lebih kecil di mana masing-masing elemen *node* yang digunakan untuk mewakili nilai variabel (contohnya, temperatur, tegangan dan perpindahan panas) yang membawahi elemen fungsi interpolasi (disebut juga fungsi aproksimasi). Persamaan matriks menjabarkan sifat-sifat setiap elemen. Hal tersebut ditentukan dengan menggunakan salah satu dari tiga pendekatan, yaitu; pendekatan langsung, pendekatan variasional, atau pendekatan *weighted residual*.



Gambar 2.10 Proses Pengerjaan Pada MEH

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Metode Penelitian



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2. Spesifikasi Material dan Parameter

3.2.1. Material Tube

Pada penelitian ini, material yang digunakan pada proses tube bending adalah AISI 304L. Data material yang ada diperoleh dari North American Stainless dengan menggunakan standar UNS S30430, EN 1.4307 dan ASM Handbook Vol 1. Komposisi dari AISI 304L dapat dilihat pada Tabel 3.1 dan untuk properti material AISI 304L dapat dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.1 Standar Komposisi Kimia AISI 304L (NAS-UNS S30430, EN 1.4307)

Unsur	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni
Min						18.00	8.00
Max	0.03	2.0	0.045	0.030	1.00	20.00	12.00

Tabel 3.2 Properti Material dari AISI 304L

Konduktivitas (W/m K)	31.7
Specific Heat (J/kg K)	682
Koefisien Konveksi (W/m ²)	20
Poisson ratio	0.3
Modulus Elastisitas (Gpa)	196
Density (kg/m ³)	7850
Thermal Expansion (1/K)	2.00E-5

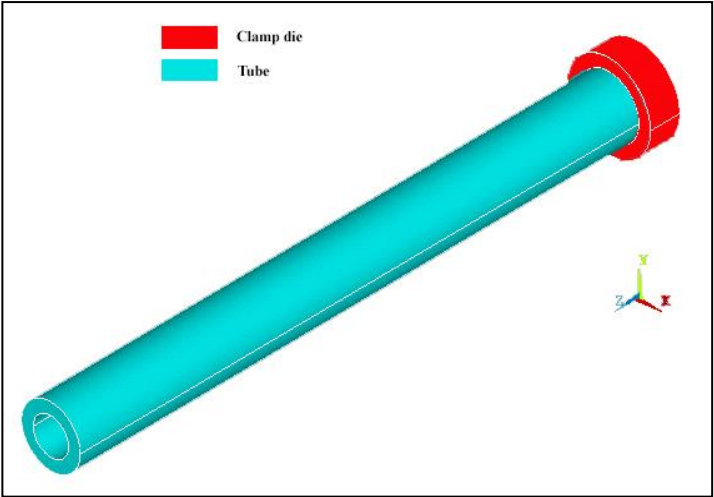
3.2.2. Geometri Tube

Geometri yang digunakan kedua metode *bending* pada penelitian ini yaitu tube berpenampang lingkaran. Penampang lingkaran ini memiliki ukuran *outer diameter* sebesar 15mm dengan ketebalan *tube* 2mm. Kedua metode memiliki panjang yang sama yaitu 800mm.

3.2.3. Laser Beam Bending

Desain penampang *tube* serta alat *laser beam bending* beserta komponennya ditunjukkan pada Gambar 3.2. Adapun parameter yang dipakai dalam metode penelitian *laser beam*

bending, dibagi ke dalam beberapa variabel seperti *laser power* serta *pass number*. Beberapa parameter ini ditunjukkan dalam Tabel 3.3.



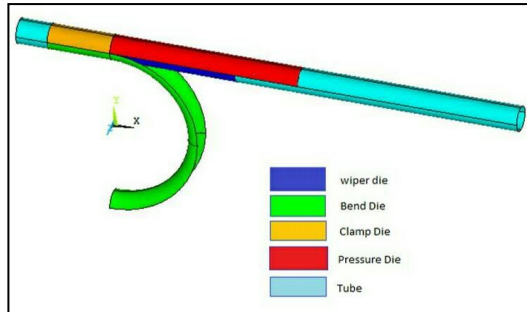
Gambar 3.2 Desain *Laser Beam Bending*

Tabel 3.3 Parameter *Laser Beam Bending*

<i>Cooling Time (s)</i>	<i>Laser Power (W)</i>	<i>Pass Number</i>
180	900	2 <i>pass</i>
		3 <i>pass</i>
		4 <i>pass</i>
	1200	2 <i>pass</i>
		3 <i>pass</i>
		4 <i>pass</i>
	1500	2 <i>pass</i>
		3 <i>pass</i>
		4 <i>pass</i>

3.2.4. Rotary Draw Bending

Desain penampang *tube* serta alat *rotary draw bending* beserta komponennya ditunjukkan pada Gambar 3.3. Sedangkan parameter untuk metode penelitian *rotary draw bending* ini ditunjukkan oleh Tabel 3.4 berikut



Gambar 3.3 Desain *Rotary Draw Bending*

Tabel 3.4 Parameter *Rotary Draw Bending*

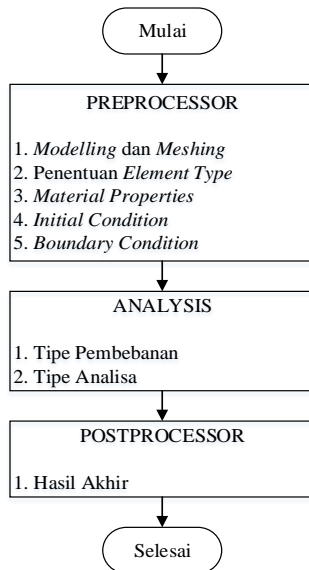
<i>Pressure (Mpa)</i>	5
<i>Coeffitien Friction (u)</i>	0.1
<i>Pressure Die</i>	0.1
<i>Clamp Die</i>	0.2
<i>Others</i>	0.1
<i>Bending Radius (mm)</i>	45

3.3. Peralatan

Peralatan yang digunakan dalam penelitian berupa perangkat lunak (*software*) berbasis metode elemen hingga yaitu ANSYS dengan modul Mechanical APDL Release 17.1 yang digunakan untuk membuat pemodelan *springback* dan memodelkan simulasi metode *rotary draw bending* dan *laser beam bending*.

3.4. Proses Penelitian

Adapun diagram alir pemodelan *bending* dengan menggunakan ANSYS Mechanical APDL Release 17.1 dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut.



Gambar 3.4
Diagram Alir

Pemodelan Menggunakan Metode Elemen Hingga

3.4.1. Pemodelan Pipa

Tipe pemodelan yang digunakan pada penelitian ini untuk kedua metode menggunakan *element type* SHELL 132 dengan 8 *nodes* untuk analisa termal dan SHELL281 dengan 8 *nodes* untuk analisa struktural, dengan satu derajat kebebasan (DOF) temperatur pada masing masing *nodes*. Pada metode *laser beam bending* digunakan dua analisa yaitu termal dan struktural. Properti material yang dimasukkan untuk analisa termal antara lain konduktivitas termal isotropic, *specific heat*, densitas, serta koefisien konveksi, lalu untuk analisa structural antara lain

poisson ratio, modulus elastisitas, serta densitas. Adapun pemodelan *boundary condition* pada *laser beam bending* untuk analisa termal, perpindahan panas yang terjadi adalah konveksi, dimana konveksi terjadi pada semua permukaan *tube* kecuali pada daerah yang dikenai laser, konveksi yang terjadi merupakan *free convection* artinya konveksi tanpa ada pengaruh dari luar. Proses adiabatik dianggap terjadi pada *tube path* yang dikenai sinar laser. Untuk analisa structural, salah satu sisi *tube* akan dijepit ke segala arah, sehingga dapat dilihat respon mekanik yang terjadi. Sedangkan untuk *die* pada *rotary draw bending* dianggap *rigid*.

3.4.2. Meshing

Meshing yang digunakan pada simulasi *rotary draw bending* menggunakan metode *free mesh* dengan elemen segitiga dan *smartsizes* 1 untuk *tube*. Elemen segitiga dipilih karena mempermudah memperoleh konvergensi namun diperlukan *meshing* dengan ukuran yang cukup halus.

3.4.3. Tipe Pembebanan

Pembebanan pada penelitian kali ini dibagi berdasarkan tipe pembebanan untuk masing-masing metode. Untuk tipe pembebanan metode *laser beam bending* yaitu pembebanan termal. Pada proses termal, *tube* akan diberi panas yang berasal dari laser dalam bentuk *heatflux*, melintang pada tengah sisi kiri *tube* selama 10 detik. Setelah proses pemanasan selesai, maka dilakukan proses pendinginan dengan *free convection* selama 180 detik. Proses pemanasan dan pendinginan ini dilakukan selama dua kali (2 *pass*) untuk mendapatkan hasil distribusi temperatur. Nilai distribusi temperature ini kemudian akan menjadi pembebanan struktural yang akan ditambahkan dengan beban displacement pada sisi kanan *tube* sebesar 0 sebagai *boundary condition*. Langkah ini akan diulang kembali untuk jumlah *pass* serta *laser power* lainnya. Sedangkan tipe pembebanan pada metode *rotary draw bending*, menggunakan *displacement* ke arah

sumbu Z (ROTZ) dengan menggunakan *pilot node* pada *bend die*, dan *pressure* pada tube dengan nilai *internal pressure* = 5.

Pembebanan pada metode *laser beam bending* dilakukan hingga mencapai sudut tertentu yang merupakan batas maksimal kemampuannya bila tanpa adanya *external pressure*. Hal ini dikarenakan metode *laser beam bending* memiliki keterbatasan sudut *bending* yang besarnya akan dicari pada percobaan kali ini. Hasil analisa struktur dari metode *laser beam bending* ini nantinya akan dibandingkan dengan metode *rotary draw bending*. Seluruh variasi pembebanan akan dijelaskan di dalam Tabel 3.5 di bawah ini.

Tabel 3.5 Variasi Pembebanan pada Percobaan

<i>Laser Power (W)</i>	<i>Pass Number</i>
900	2 <i>pass</i>
	3 <i>pass</i>
	4 <i>pass</i>
1200	2 <i>pass</i>
	3 <i>pass</i>
	4 <i>pass</i>
1500	2 <i>pass</i>
	3 <i>pass</i>
	4 <i>pass</i>

3.4.4. Tipe Analisa

Proses analisa yang digunakan untuk kedua metode adalah analisa *springback*, yang didapat dari nilai *displacement*. Selain itu, analisa tegangan *Von Mises* juga dapat digunakan untuk menganalisa ada tidaknya pelepasan tegangan sebagai tanda akan terjadinya *springback*. Adapun perbandingan masing-masing metode *bending* pada percobaan ini dijelaskan dalam Tabel 3.6 di bawah ini.

Tabel 3.6 Perbandingan Metode Proses Penelitian

Metode	Material	Geometri		Pembebanan	Analisa
		OD (mm)	Tebal (mm)		
<i>Laser Beam Bending</i>	AISI 304L	15	2	Termal	Sudut <i>bending</i> dan <i>springback</i>
<i>Rotary Draw Bending</i>	AISI 304L	15	2	<i>Displacement dan pressure</i>	<i>Springback</i>

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Analisa Hasil

Pada penelitian kali ini dilakukan proses *bending* menggunakan metode *laser beam bending* untuk variasi *laser power* sebesar 900 W, 1200 W, serta 1500 W. Selain itu, digunakan pula variasi jumlah *pass* sebesar 2 *pass*, 3 *pass*, serta 4 *pass*. Variasi ini dilakukan untuk mengetahui sudut *bending* maksimum yang dapat dicapai oleh metode ini tanpa pemberian beban eksternal selain termal. Selanjutnya akan dilakukan analisa *springback* yang terjadi pada proses, membandingkan hasil *bending*, baik sudut *bending* ataupun *springback* dari metode *laser beam bending* dengan metode *rotary draw bending*.

Untuk menentukan jumlah *springback*, maka simulasi tegangan yang akurat dilakukan dengan memberikan suatu beban dalam jangka waktu tertentu kemudian mengamati perilaku *unloading* dari logam tersebut. Pada penelitian kali ini akan dilakukan dua tipe pembebanan untuk masing-masing metode. Setiap metode akan mendapatkan tipe pembebanan yang berbeda. Untuk metode *laser beam bending*, tipe pembebanan yang akan diberikan adalah tipe pembebanan termal menggunakan *heatflux*. Sedangkan untuk metode *rotary draw bending*, tipe pembebanan yang akan diberikan adalah tipe pembebanan struktural berupa *displacement*. Analisa *springback* pada penelitian *laser beam bending* kali ini dilakukan dengan cara mengamati perubahan *displacement* dan juga *von mises stress* pada saat proses pelepasan beban terakhir untuk setiap *pass*. Adapun untuk analisa *springback* pada metode *rotary draw bending* diamati pada saat proses pelepasan beban setelah *bending*.

Pemodelan analisa *springback* untuk metode *laser beam bending* dimulai dengan membuat desain *tube*. Pada *tube* kemudian diberikan *heatflux*. Setelah melakukan pengaturan pada *software* yang digunakan maka dilakukan proses *solving*. Hasil yang didapat dari simulasi adalah perpindahan yang terjadi serta

nilai *von misses stress*-nya. Hasil ini belum memperlihatkan *springback* yang muncul. Untuk mendapatkan *springback*-nya dilakukan proses penghilangan beban dari benda kerja dengan cara pendinginan menggunakan konveksi. Mekanisme pendinginan inilah yang memunculkan *springback* pada proses ini.

Hasil yang didapat dari simulasi metode *laser beam bending*, kemudian dibandingkan dengan proses *rotary draw bending* secara keseluruhan meliputi kemampuan sudut *bending*, *springback*, radius *bending*, serta kemulusan hasil *bending*.

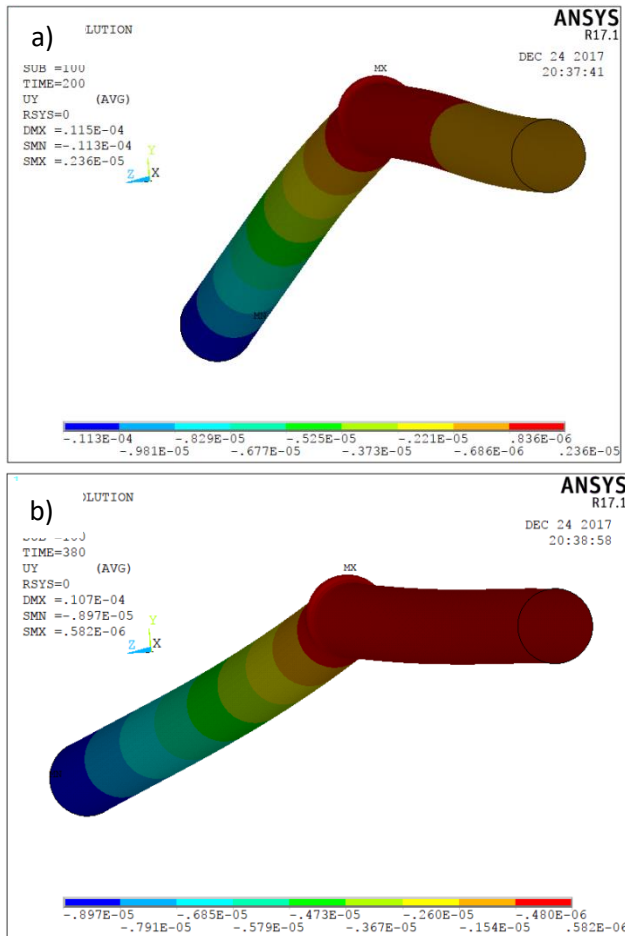
4.1.1. Analisa Laser Beam Bending

Di bawah ini, dapat dilihat selisih nilai *displacement* yang muncul pada saat proses pemanasan dan pendinginan terakhir. Indikasi *springback* dianalisa melalui perbandingan *displacement* saat pembebanan termal terakhir dengan saat pendinginan terakhir. Berdasarkan nilai selisih perpindahan inilah didapat nilai *springback* dengan mengkorvesikan perpindahan tersebut ke dalam sudut. Analisa *von missess stress* juga dilakukan karena menurut beberapa hasil penelitian sebelumnya, bahwa *springback* adalah fenomena *strain recovery* yang disebabkan oleh pelepasan tegangan sisa pada logam saat pelepasan beban. Berikut merupakan hasil *springback*, *von mises stress*, serta gradiasi temperatur untuk metode *laser beam bending* dengan *laser power* 900 W, 1200 W, dan 1500 W dengan jumlah *pass* masing-masing *power* sebanyak 2 *pass*, 3 *pass*, serta 4 *pass*.

4.1.1.1. Laser Power 900 W

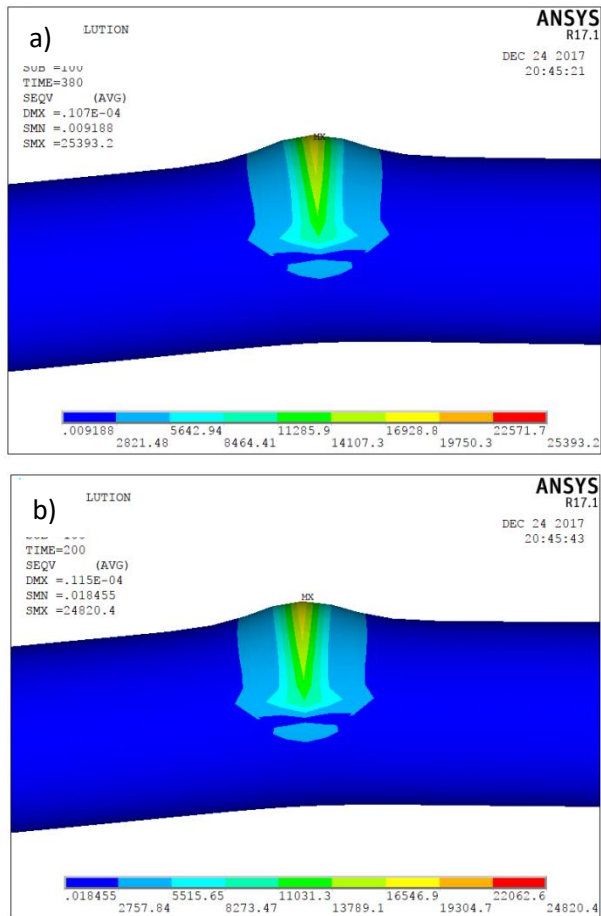
a) 2 pass

Dari data ini, didapat bahwa sudut *bending* maksimum untuk parameter ini adalah $0,0006478^\circ$ serta *springback* yang muncul adalah sebesar $0,0001336^\circ$. Lebih lanjut dapat diamati pada Gambar 4.1 berikut ini.



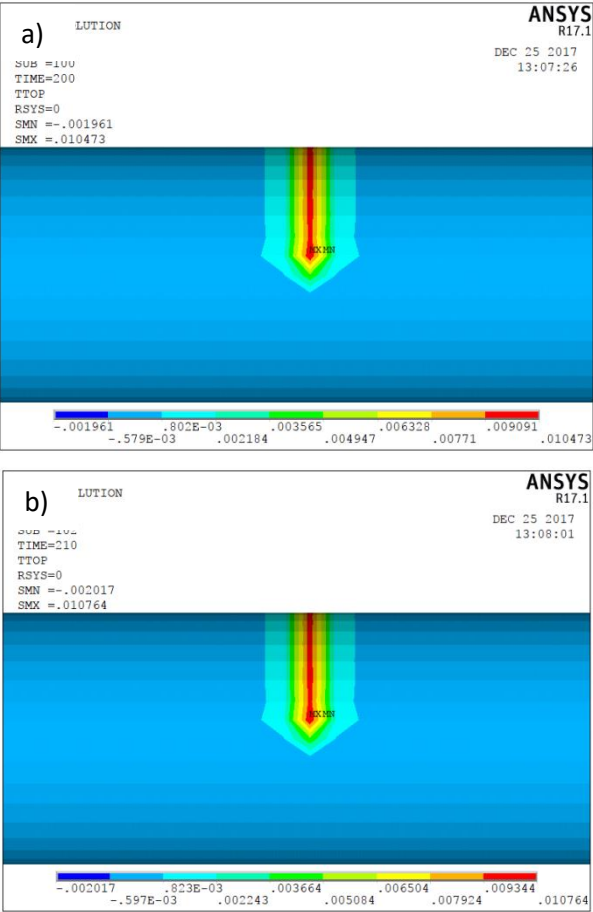
Gambar 4.1 Displacement 900 W 2 Pass a) Loading b) Unloading

Adapun, Gambar 4.2 menunjukkan hasil *von mises stress* yang timbul pada saat penelitian. Berdasarkan data di bawah maka, terjadi kenaikan nilai *von mises stress* sebesar 572,8 Pa ketika beban termal telah dihilangkan.



Gambar 4.2 Von Mises Stress untuk 900 W dengan 2 Pass pada
a) Loading b) Unloading

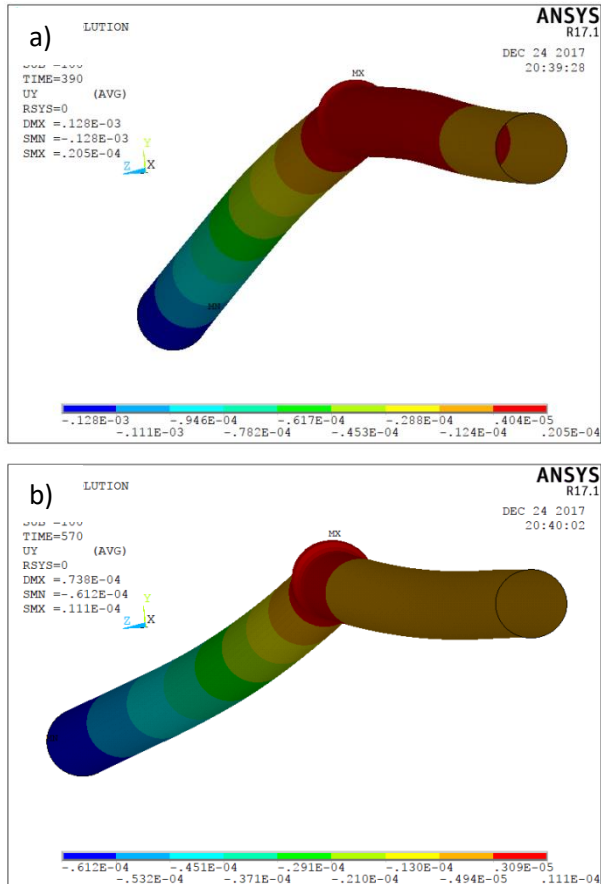
Sedangkan, berikut adalah hasil gradiasi temperatur yang dijelaskan pada Gambar 4.3 di bawah ini.



Gambar 4.3 Gradiasi Temperatur untuk 900 W dengan 2 Pass pada a) Loading b) Unloading

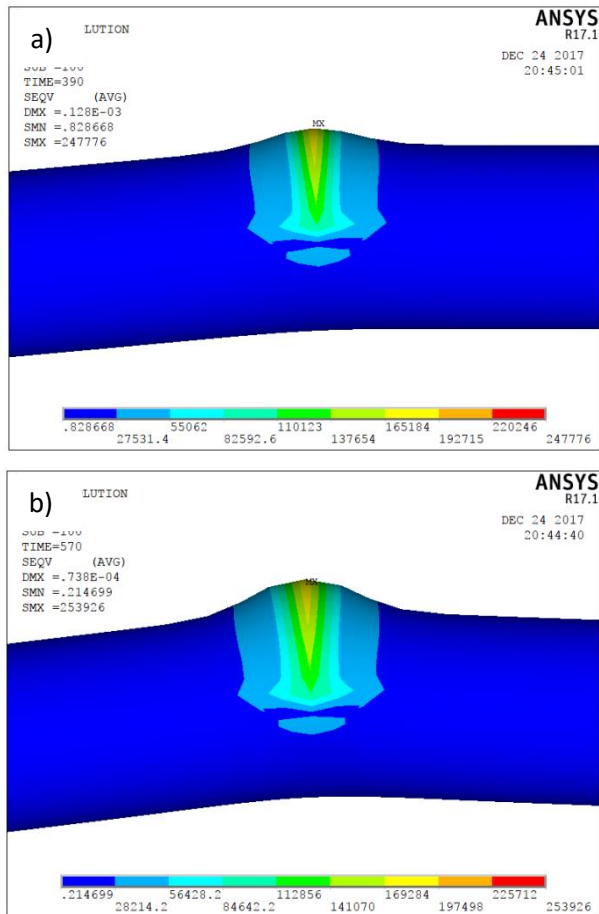
a) 3 pass

Dari data di bawah ini, didapat bahwa sudut *bending* maksimum untuk parameter ini adalah $0,007338^\circ$ serta *springback* yang muncul adalah sebesar $0,003829^\circ$. Lebih lanjut dapat diamati pada Gambar 4.4 berikut ini.



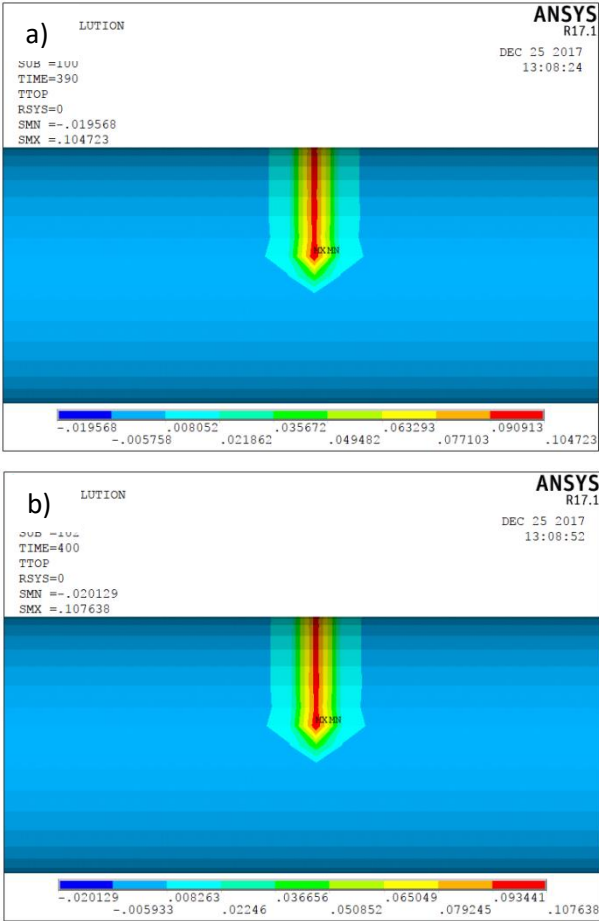
Gambar 4.4 Displacement 900 W 3 Pass a) Loading b) Unloading

Adapun, Gambar 4.5 menunjukkan hasil *von mises stress* yang timbul pada saat penelitian. Berdasarkan data di atas maka, terjadi kenaikan nilai *von mises stress* sebesar 6.150 Pa ketika beban termal telah dihilangkan.



Gambar 4.5 Von Mises Stress untuk 900 W dengan 3 Pass pada
 a) Loading b) Unloading

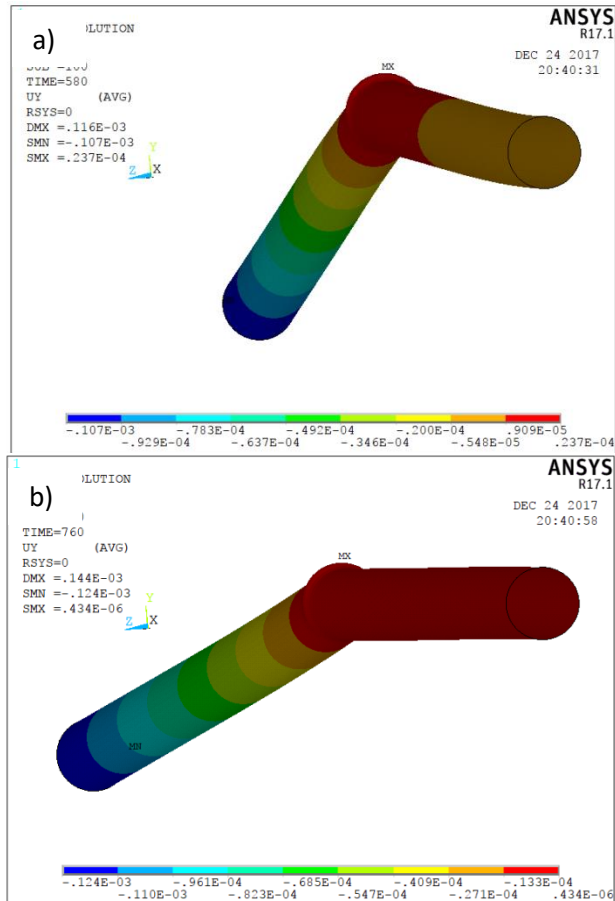
Sedangkan, berikut adalah hasil gradiasi temperatur yang dijelaskan pada Gambar 4.6 di bawah ini.



Gambar 4.6 Gradiasi Temperatur untuk 900 W dengan 3 Pass pada a) Loading b) Unloading

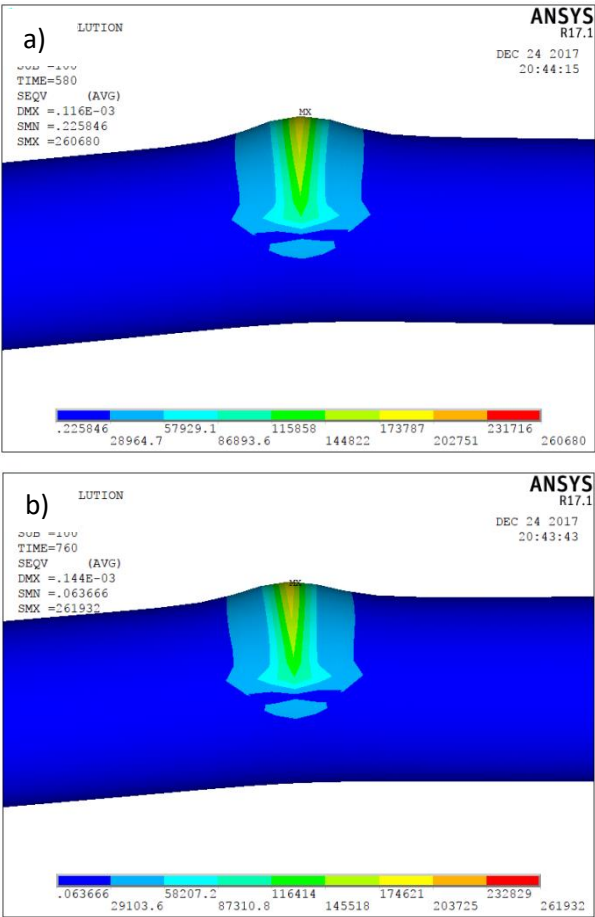
b) 4 pass

Dari data di bawah ini, didapat bahwa sudut *bending* maksimum untuk parameter ini adalah $0,006134^\circ$. Kali ini tidak terjadi *springback* namun, terdapat penambahan sudut sebesar $0,0009745^\circ$. Lebih lanjut dapat diamati pada Gambar 4.7 berikut ini



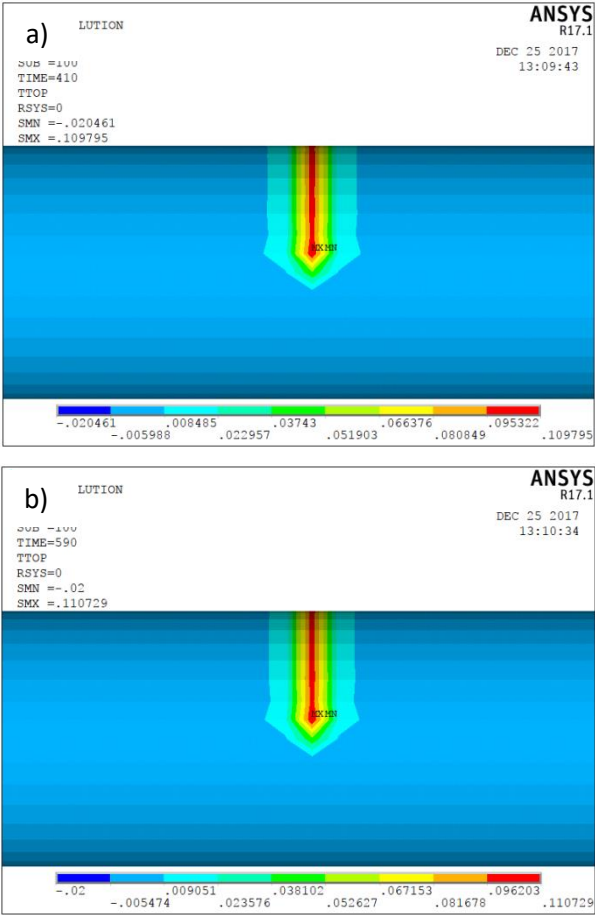
Gambar 4.7 Displacement 900 W 4 Pass a) Loading b) Unloading

Adapun, Gambar 4.8 menunjukkan hasil *von mises stress* yang timbul pada saat penelitian. Berdasarkan data di atas maka, terjadi kenaikan nilai *von mises stress* sebesar 1.252 Pa ketika beban termal telah dihilangkan.



Gambar 4.8 Von Mises Stress untuk 900 W dengan 4 Pass pada
a) Loading b) Unloading

Sedangkan, berikut adalah hasil gradiasi temperatur yang dijelaskan pada Gambar 4.9 di bawah ini.

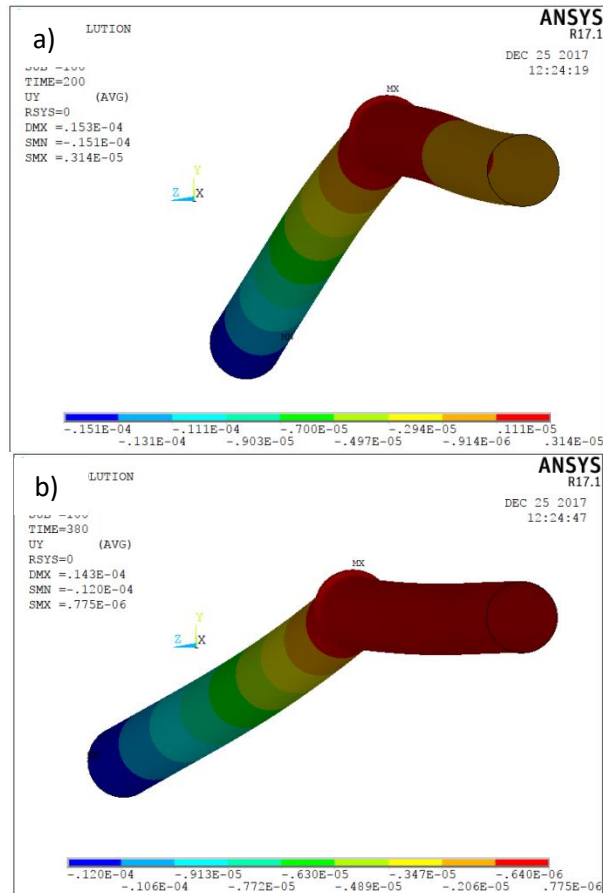


Gambar 4.9 Gradiasi Temperatur untuk 900 W dengan 4 Pass pada a) Loading b) Unloading

4.1.1.2. Laser Power 1200 W

a) 2 pass

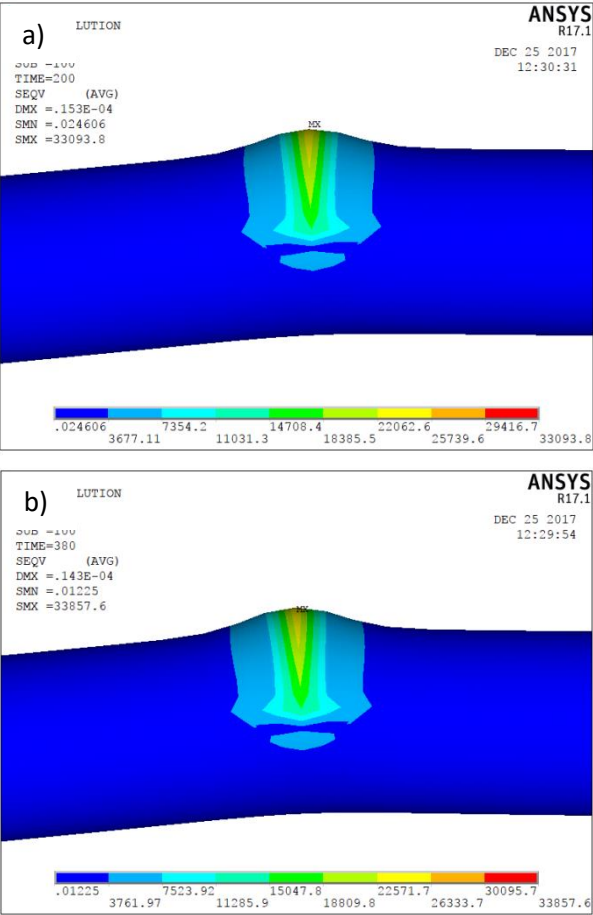
Dari data di bawah ini, didapat bahwa sudut *bending* maksimum untuk parameter ini adalah $0,0008656^\circ$ serta *springback* yang muncul adalah sebesar $0,0001777^\circ$. Lebih lanjut dapat diamati pada Gambar 4.10 berikut.



Gambar 4.10 Displacement 1200 W 2 Pass a) Loading b) Unloading

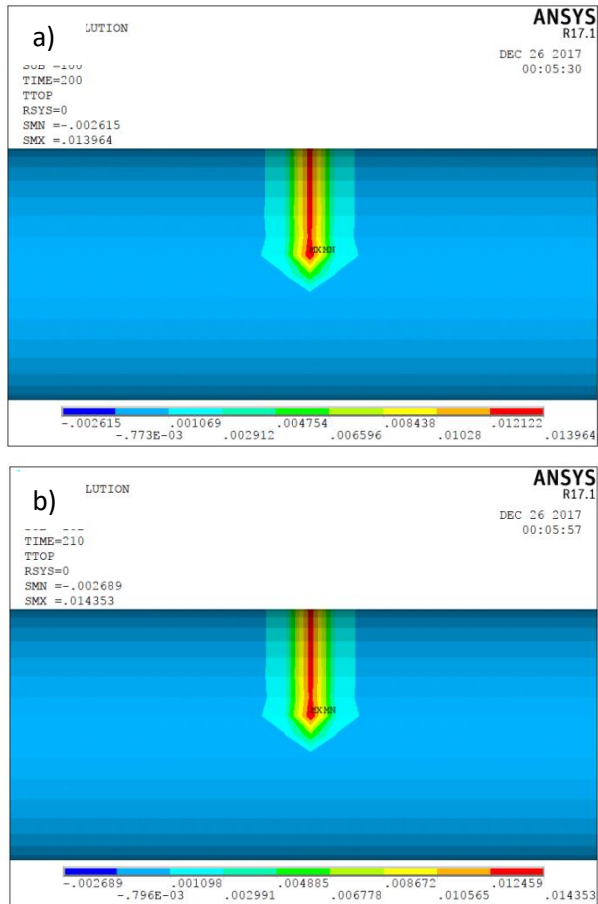
Adapun, Gambar 4.11 menunjukkan hasil *von mises stress* yang timbul pada saat penelitian. Berdasarkan data

di atas maka, terjadi kenaikan nilai *von mises stress* sebesar 764,6 Pa ketika beban termal telah dihilangkan.



Gambar 4.11 Von Mises Stress untuk 1200 W dengan 2 Pass pada a) Loading b) Unloading

Sedangkan, berikut adalah hasil gradiasi temperatur yang dijelaskan pada Gambar 4.12 di bawah ini.

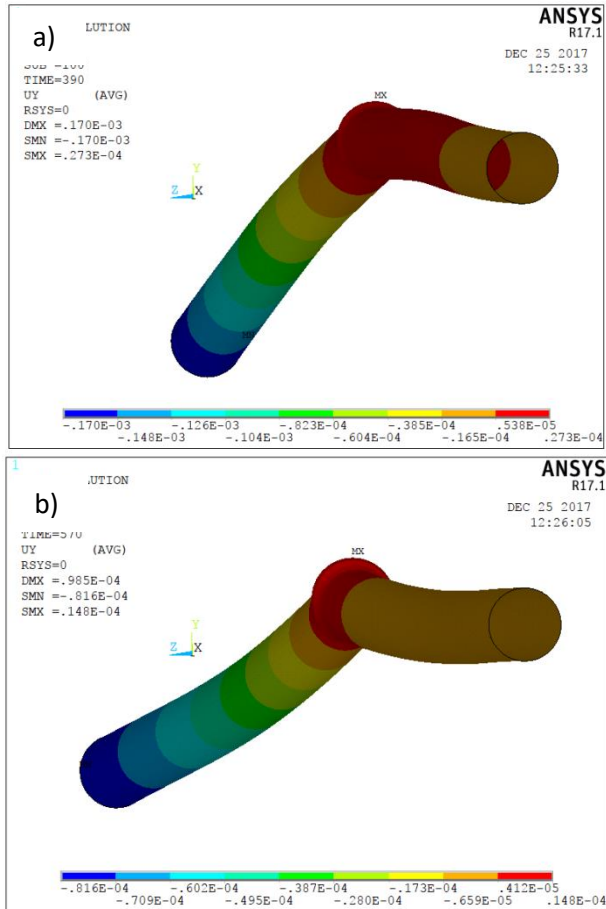


Gambar 4.12 Gradiasi Temperatur untuk 1200 W dengan 2 Pass pada a) Loading b) Unloading

b) 3 pass

Dari data di bawah ini, didapat bahwa sudut *bending* maksimum untuk parameter ini adalah $0,009745^{\circ}$ serta

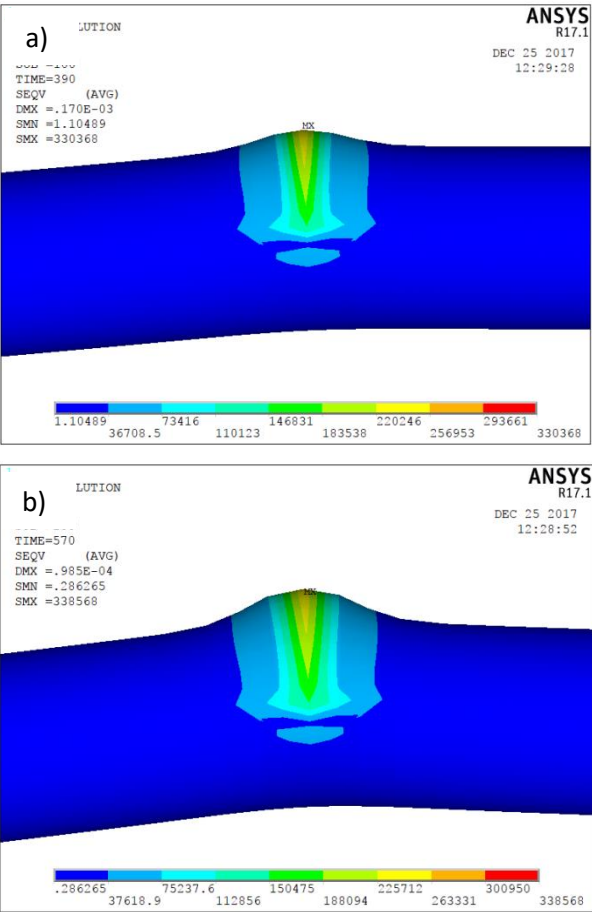
springback yang muncul adalah sebesar $0,005068^\circ$. Lebih lanjut dapat diamati pada Gambar 4.13 berikut.



Gambar 4.13 Displacement 1200 W 3 Pass a) Loading b) Unloading

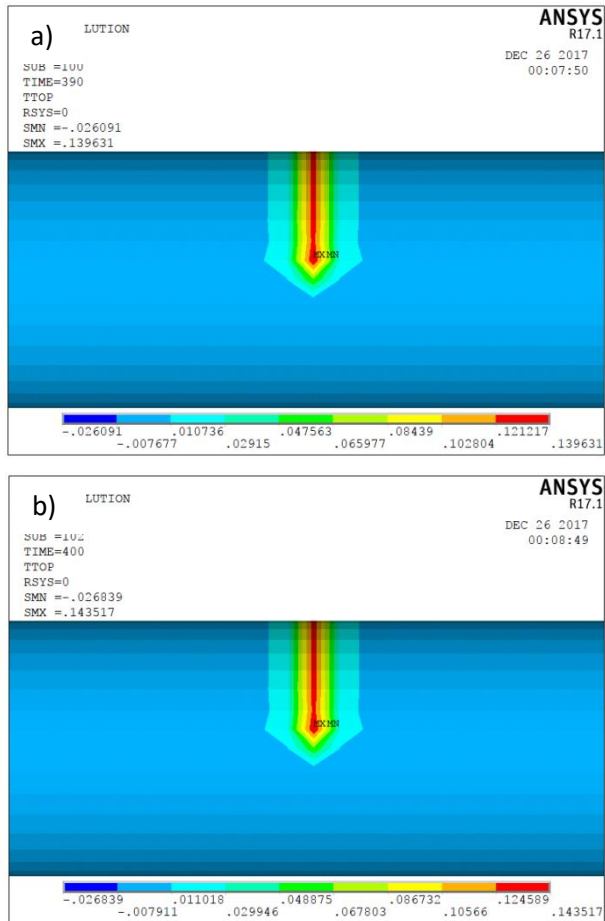
Adapun, Gambar 4.14 menunjukkan hasil *von mises stress* yang timbul pada saat penelitian. Berdasarkan data

di atas maka, terjadi kenaikan nilai *von mises stress* sebesar 8.200 Pa ketika beban termal telah dihilangkan.



Gambar 4.14 *Von Mises Stress* untuk 1200 W dengan 3 Pass pada a) Loading b) Unloading

Sedangkan, berikut adalah hasil gradiasi temperatur yang dijelaskan pada Gambar 4.15 di bawah ini.

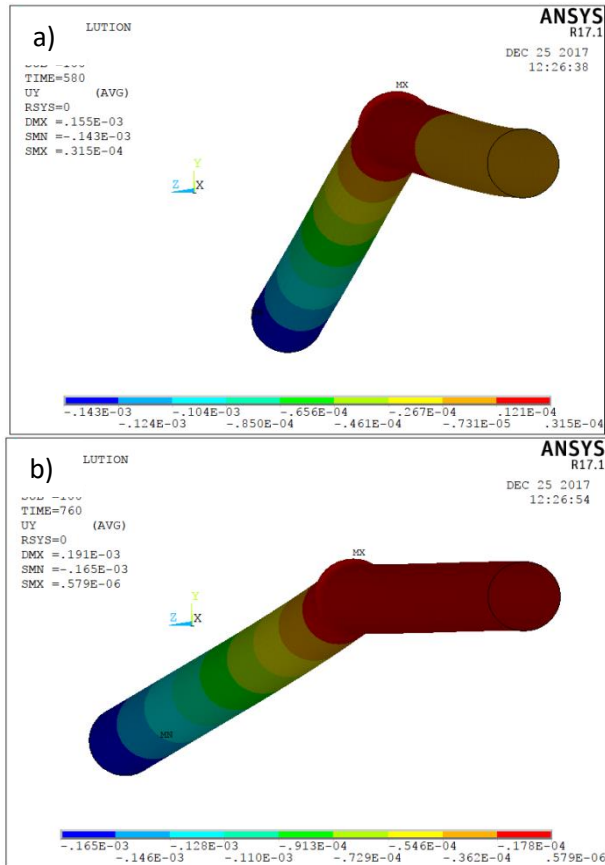


Gambar 4.15 Gradiasi Temperatur untuk 1200 W dengan 3 Pass pada a) Loading b) Unloading

c) 4 pass

Dari data di bawah ini, didapat bahwa sudut *bending* maksimum untuk parameter ini adalah $0,009459^{\circ}$. Kali ini

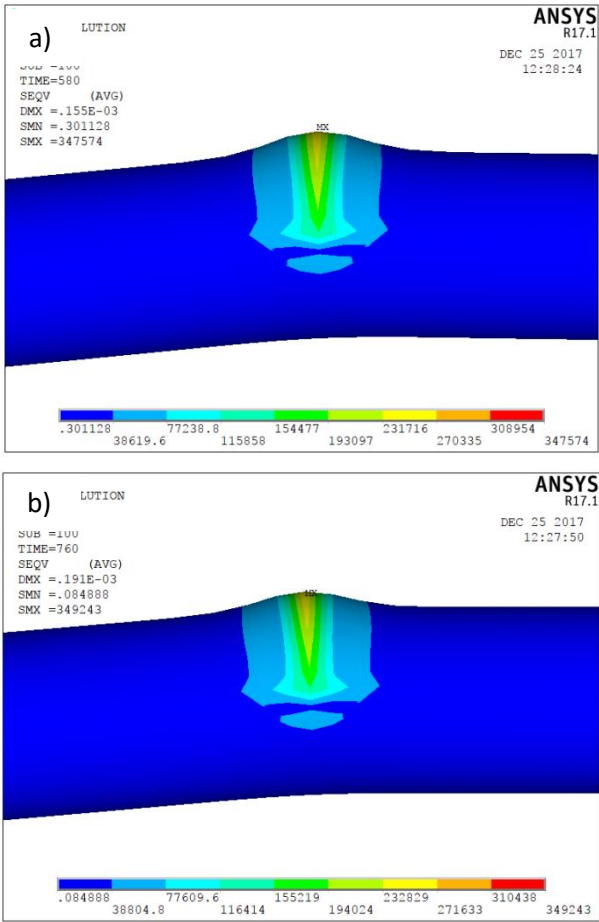
tidak terjadi *springback* namun, terdapat penambahan sudut yang muncul sebesar $0,001261^\circ$. Lebih lanjut dapat diamati pada Gambar 4.16 berikut.



Gambar 4.16 Displacement 1200 W 4 Pass a) Loading b) Unloading

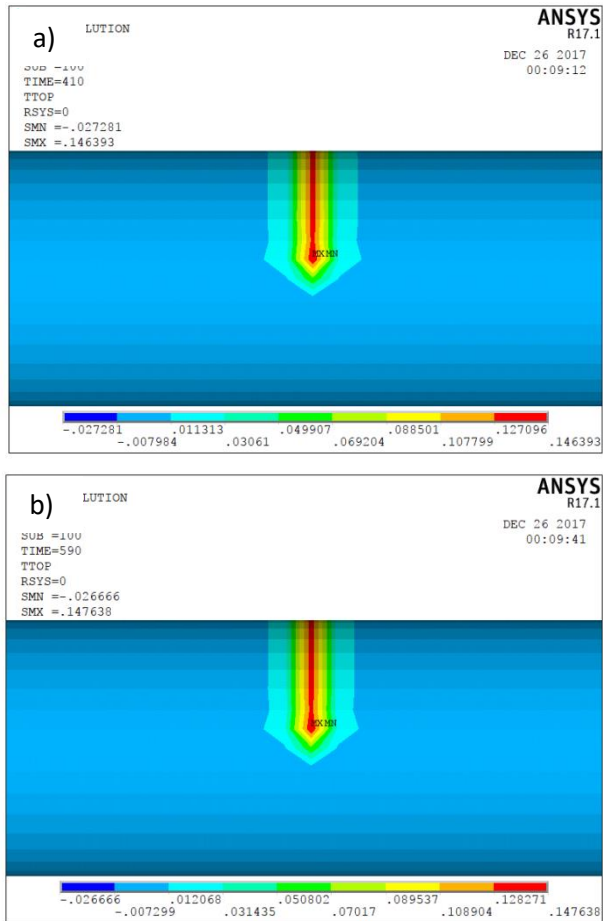
Adapun, Gambar 4.17 menunjukkan hasil *von mises stress* yang timbul pada saat penelitian. Berdasarkan data

di atas maka, terjadi kenaikan nilai *von mises stress* sebesar 1.669 Pa ketika beban termal telah dihilangkan.



Gambar 4.17 Von Mises Stress untuk 1200 W dengan 4 Pass pada a) Loading b) Unloading

Sedangkan, berikut adalah hasil gradiasi temperatur yang dijelaskan pada Gambar 4.18 di bawah ini.

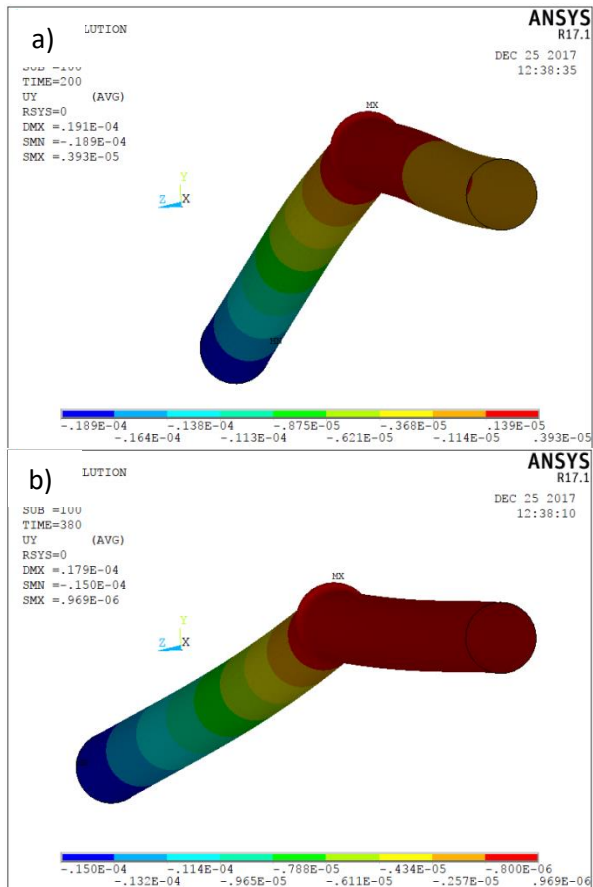


Gambar 4.18 Gradiasi Temperatur untuk 1200 W dengan 4 Pass
pada a) Loading b) Unloading

4.1.1.3. Laser Power 1500 W

a) 2 pass

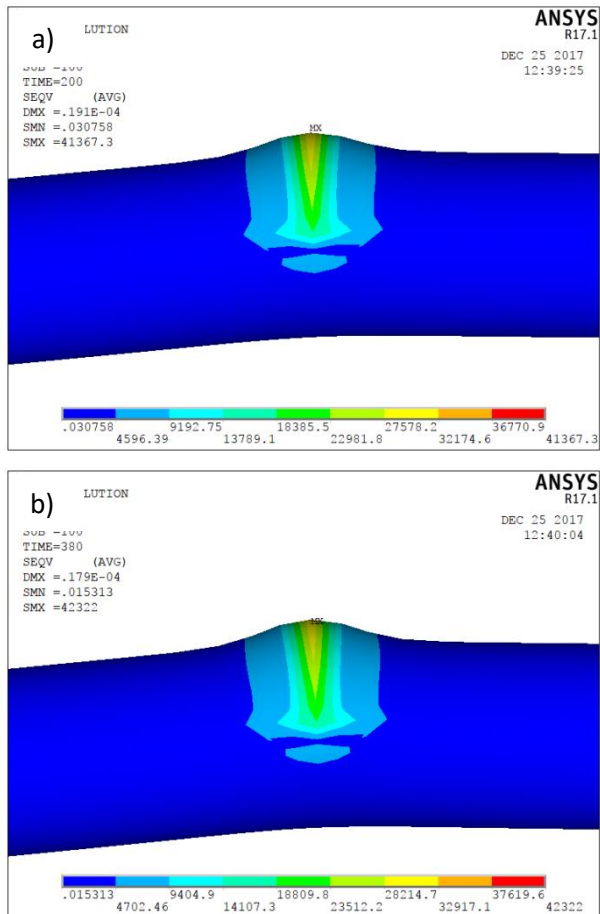
Dari data di bawah ini, didapat bahwa sudut *bending* maksimum untuk parameter ini adalah $0,0008598^\circ$ serta *springback* yang muncul adalah sebesar $0,0002236^\circ$. Lebih lanjut dapat diamati pada Gambar 4.19 berikut.



Gambar 4.19 Displacement 1500 W 2 Pass a) Loading b) Unloading

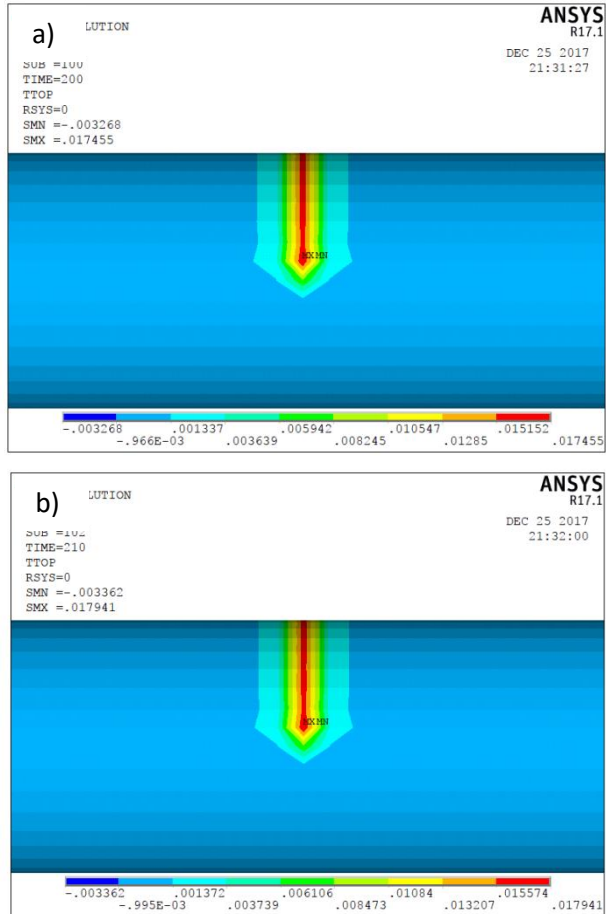
Adapun, Gambar 4.20 menunjukkan hasil *von mises stress* yang timbul pada saat penelitian. Berdasarkan data

di atas maka, terjadi kenaikan nilai *von mises stress* sebesar 954,7 Pa ketika beban termal telah dihilangkan.



Gambar 4.20 *Von Mises Stress* untuk 1500 W dengan 2 Pass pada a) Loading b) Unloading

Sedangkan, berikut adalah hasil gradiasi temperatur yang dijelaskan pada Gambar 4.21 di bawah ini.

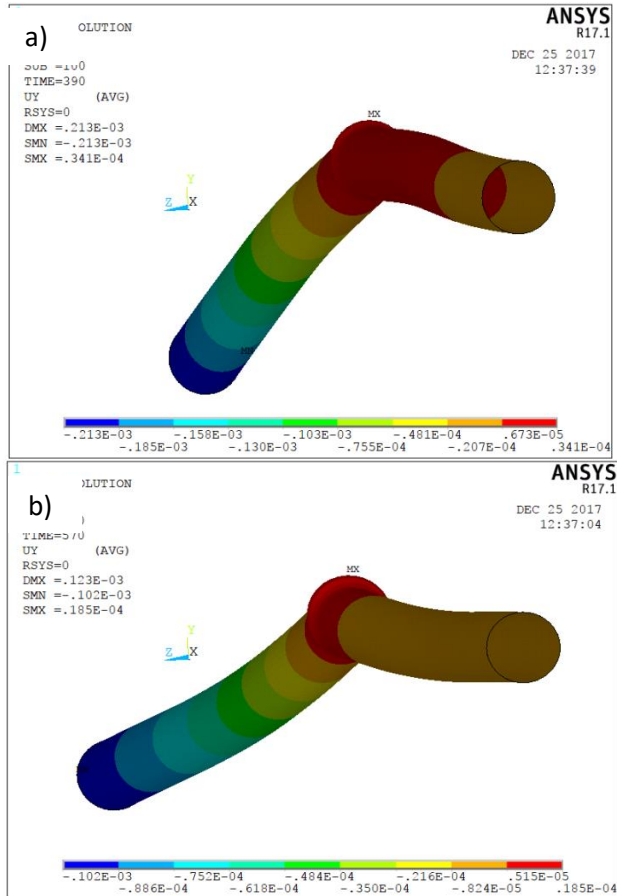


Gambar 4.21 Gradiasi Temperatur untuk 1500 W dengan 2 Pass pada a) *Loading* b) *Unloading*

b) 3 pass

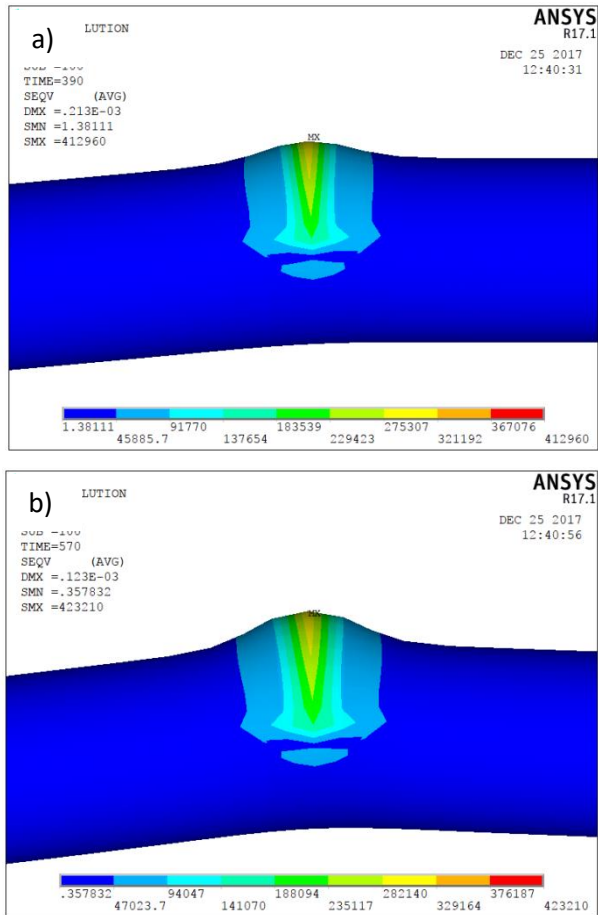
Dari data di bawah ini, didapat bahwa sudut *bending* maksimum untuk parameter ini adalah $0,01221^{\circ}$ serta

springback yang muncul adalah sebesar $0,006363^\circ$. Lebih lanjut dapat diamati pada Gambar 4.22 berikut.



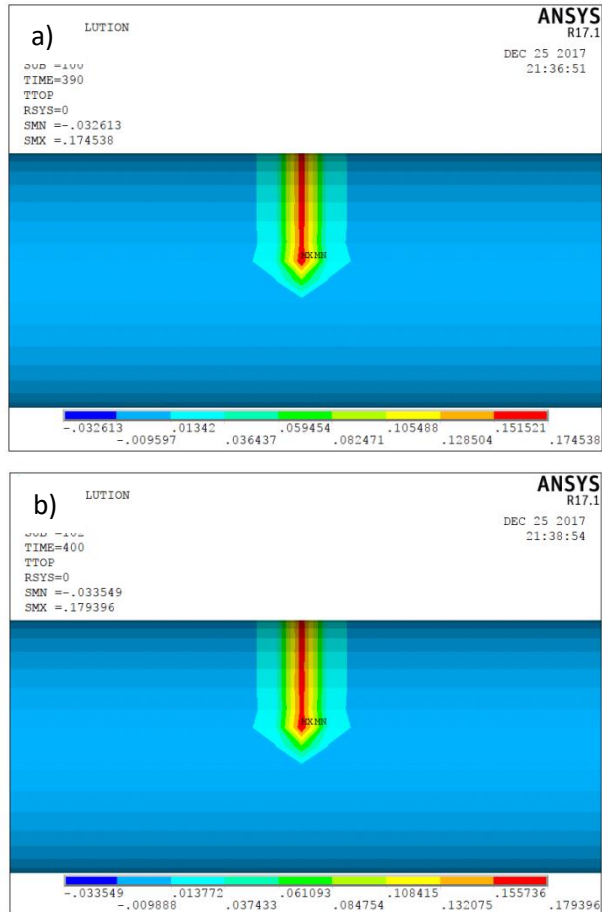
Gambar 4.22 Displacement 1500 W 3 Pass a) Loading b) Unloading

Adapun, Gambar 4.23 menunjukkan hasil *von mises stress* yang timbul pada saat penelitian. Berdasarkan data di atas maka, terjadi kenaikan nilai *von mises stress* sebesar 10.250 Pa ketika beban termal telah dihilangkan.



Gambar 4.23 Von Mises Stress untuk 1500 W dengan 3 Pass pada a) Loading b) Unloading

Sedangkan, berikut adalah hasil gradiasi temperatur yang dijelaskan pada Gambar 4.24 di bawah ini.

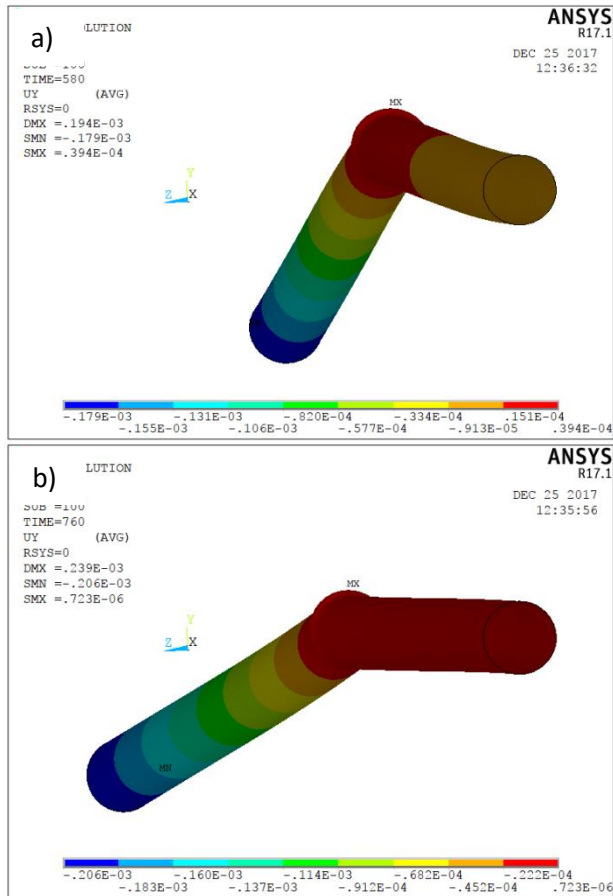


Gambar 4.24 Gradiasi Temperatur untuk 1500 W dengan 3 Pass pada a) Loading b) Unloading

c) 4 pass

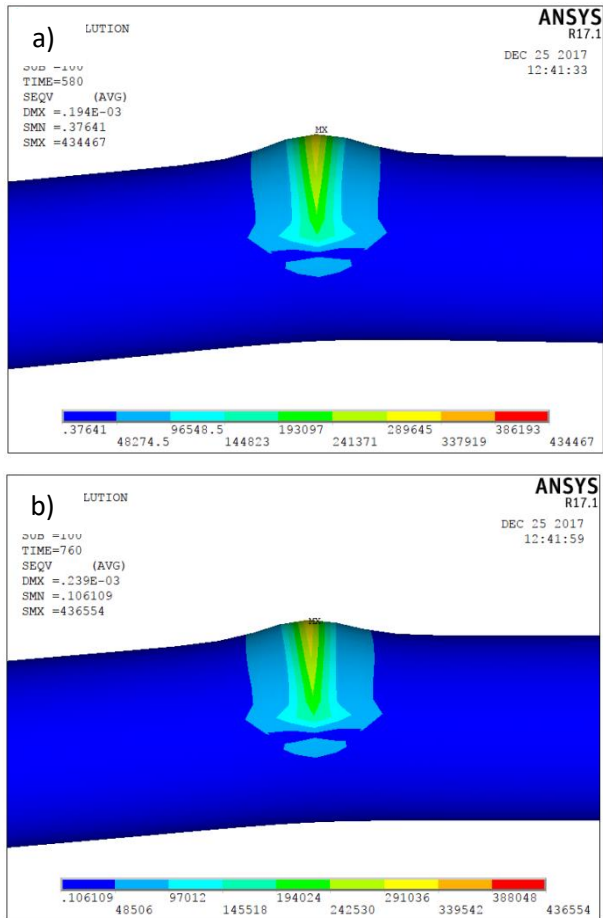
Dari data di bawah ini, didapat bahwa sudut *bending* maksimum untuk parameter ini adalah $0,01181^\circ$. Kali ini tidak terjadi *springback* namun, terdapat penambahan

sudut yang muncul sebesar $0,001548^\circ$. Lebih lanjut dapat dilihat pada Gambar 4.25 berikut.

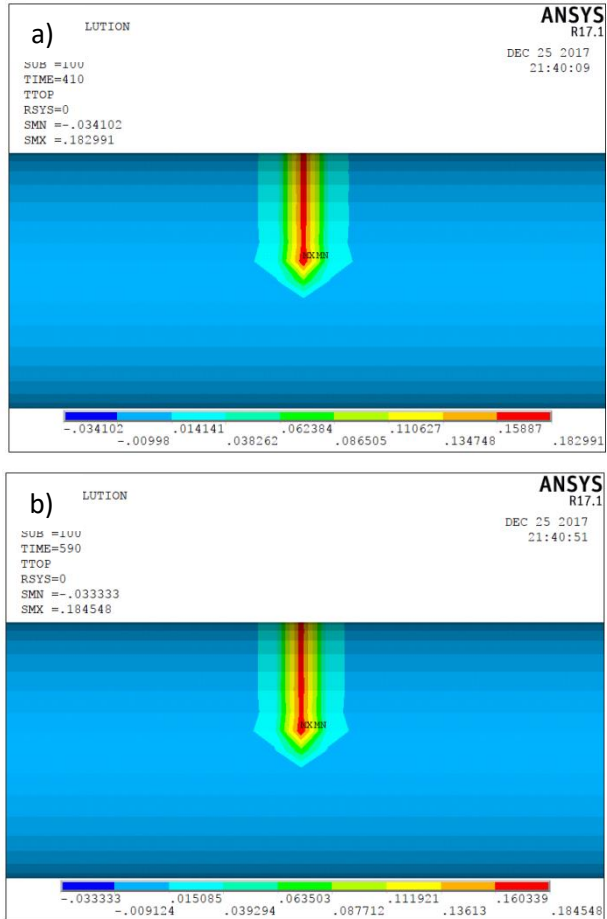


Gambar 4.25 Displacement 1500 W 4 Pass a) Loading b) Unloading

Adapun, Gambar 4.26 menunjukkan hasil *von mises stress* yang timbul pada saat penelitian. Berdasarkan data di atas maka, terjadi kenaikan nilai *von mises stress* sebesar 2.087 Pa ketika beban termal telah dihilangkan.



Gambar 4.26 Von Mises Stress untuk 1500 W dengan 4 Pass
 pada a) *Loading* b) *Unloading*
 Sedangkan, berikut adalah hasil gradiasi temperatur yang
 dijelaskan pada Gambar 4.27 di bawah ini.

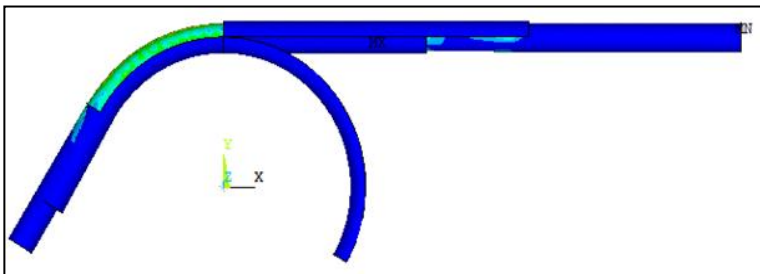


Gambar 4.27 Gradiasi Temperatur untuk 1500 W dengan 4 Pass pada a) *Loading* b) *Unloading*

4.1.2 Analisa *Rotary Draw Bending*

a) Sudut *bending* 60°

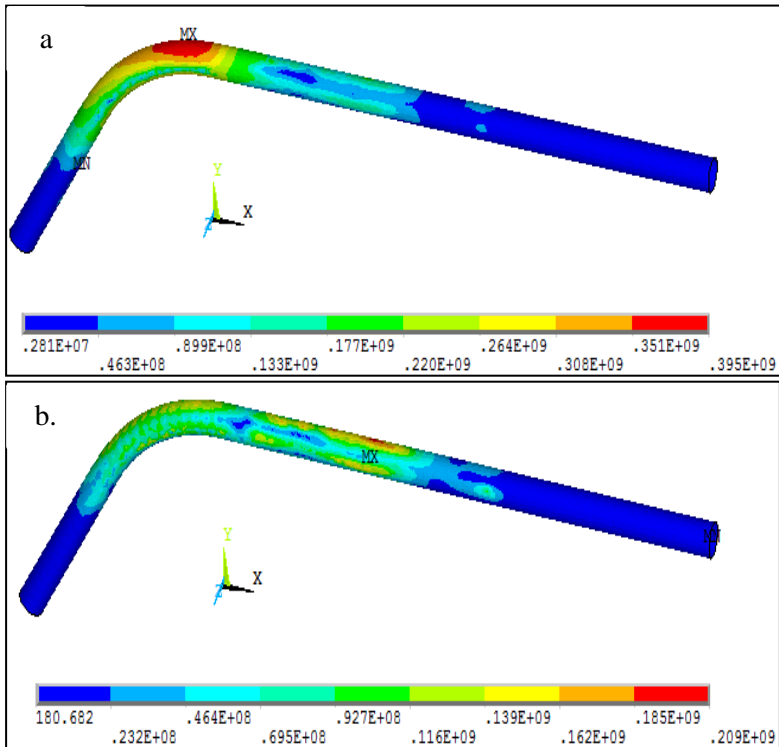
Dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback tube* pada sudut 60° adalah sebesar $1,54^\circ$. Lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 4.28 berikut.



Gambar 4.28 Hasil Simulasi Sudut *Springback* dengan Sudut 60°

Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 395 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 209 MPa. Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum

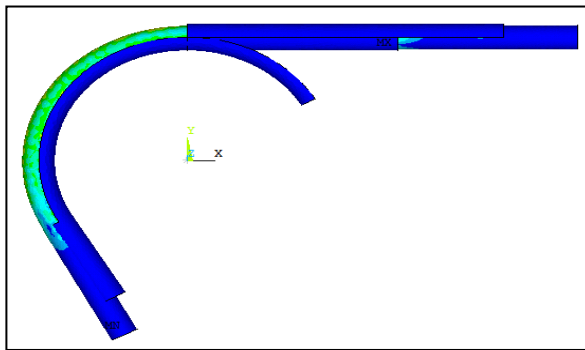
yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya. Berikut adalah Gambar 4.29 yang merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada sudut 60° .



Gambar 4.29 Von Mises Stress pada Sudut 60° dengan Kondisi
a) Loading b) Unloading

b) Sudut *bending* 120°

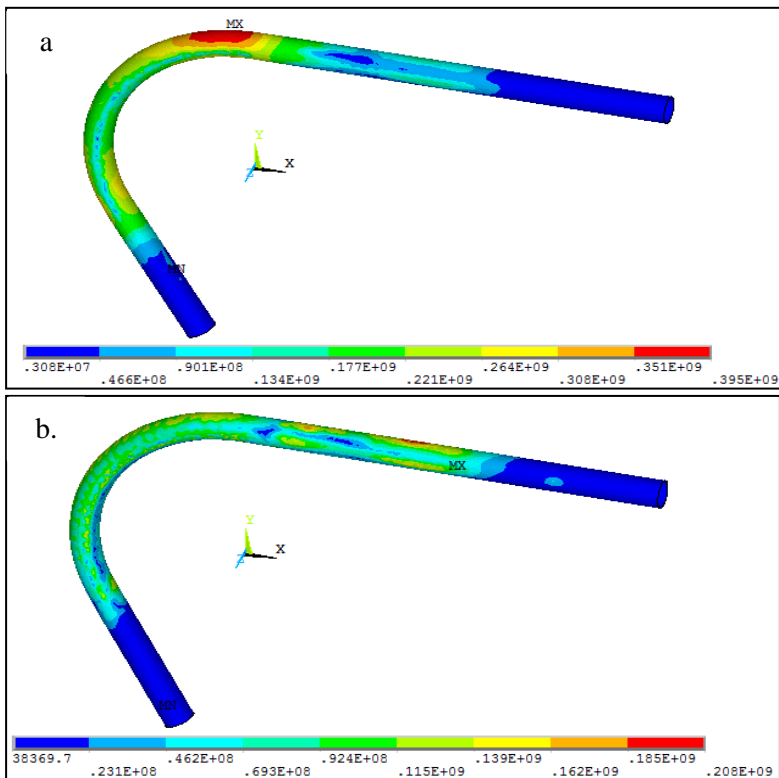
Dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback tube* pada sudut 120° adalah sebesar $2,469^\circ$. Lebih jelas dapat diamati pada Gambar 4.30 berikut



Gambar 4.30 Hasil Simulasi Sudut *Springback* dengan Sudut 120°

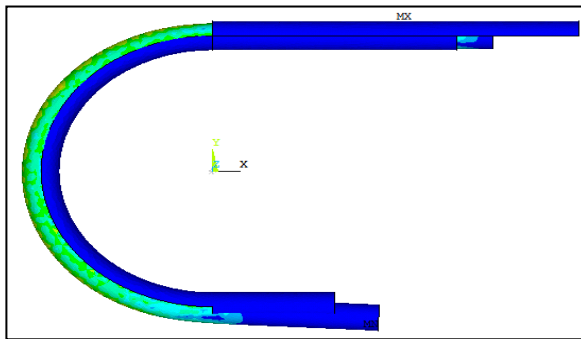
Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 395 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 208 MPa.

Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya. Berikut adalah Gambar 4.31 yang merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan pada sudut 120° .



Gambar 4.31 Von Mises Stress Sudut 120° dengan Kondisi a) Loading b) Unloading
 c) Sudut bending 180°

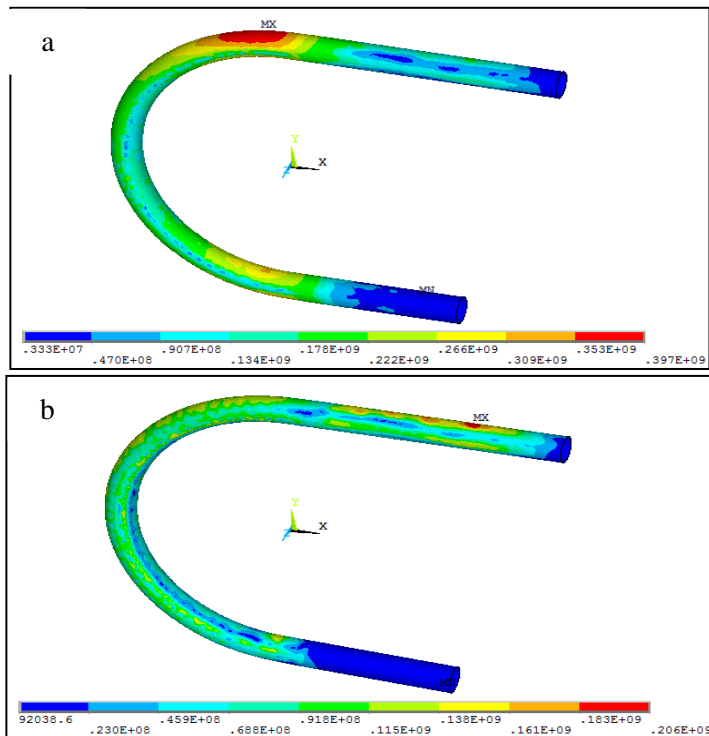
Dapat dilihat bahwa proses dari *bending* tidak sempurna. Dari gambar dapat dilihat bahwa terjadi perpindahan *tube* dari sudut *bending* yang telah ditentukan. Perpindahan ini terjadi karena adanya *recovery* elastis pada *tube* yang mengalami proses *bending*. Dari perpindahan tersebut dapat diketahui sudut *springback* dari *tube*. Sudut *springback tube* pada sudut 180° adalah sebesar $3,111^\circ$. Lebih jelas dapat dilihat pada Gambar 4.32 berikut.



Gambar 4.32 Hasil Simulasi Sudut *Springback* dengan Sudut 180°

Dari gambar hasil simulasi yang ada dapat dilihat persebaran tegangan yang terjadi pada proses *rotary draw bending* tersebut. Dari persebaran tersebut dapat dilihat bahwa tegangan tertinggi yang terjadi pada proses *rotary draw bending* ditunjukkan dengan daerah yang berwarna merah saat kondisi *loading* atau sebelum terjadinya pelepasan *tooling*. Daerah yang berwarna merah ini merupakan daerah dimana proses awal dari *bending* terjadi. Nilai maksimum *von mises stress* pada kondisi *loading* pada proses *bending* adalah sebesar 397 MPa. Pada saat *unloading* atau setelah pelepasan *tooling*, *von mises stress* yang terdapat pada proses menjadi 206 MPa.

Hal ini menunjukkan adanya pelepasan gaya yang terjadi pada saat pelepasan *tooling* atau penghilangan beban yang ada pada proses tersebut. Tegangan maksimum yang terdapat pada proses saat kondisi *loading* dan *unloading* juga berbeda dari sisi letaknya. Berikut adalah Gambar 4.33 yang merupakan *von mises stress* yang didapat dari simulasi proses *rotary draw bending* yang telah dilakukan sudut 18° .



Gambar 4.33 *Von Mises Stress* Sudut 180° dengan Kondisi a) *Loading* b) *Unloading*

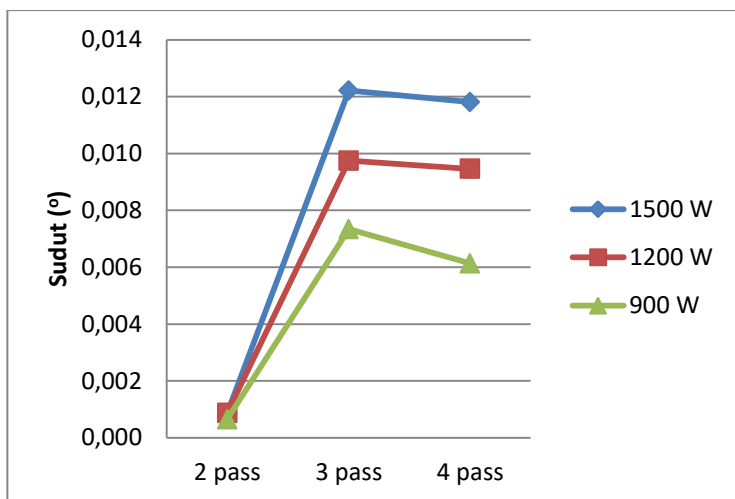
4.2. Pembahasan

4.2.1. Pembahasan *Laser Beam Bending*

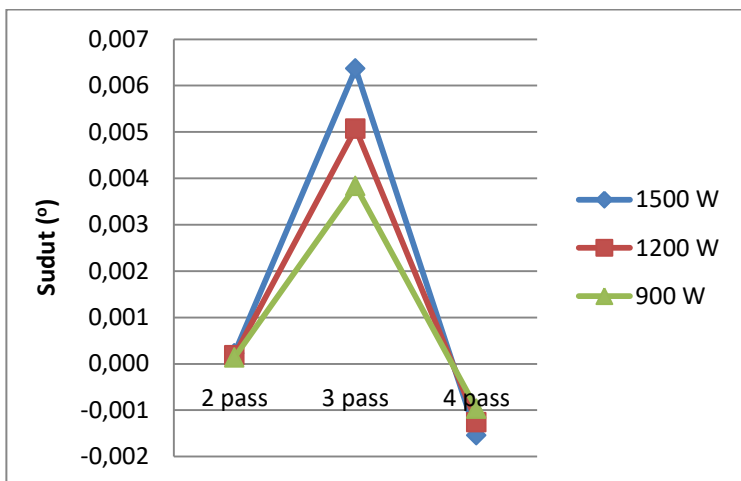
Berdasarkan analisa data yang telah dilakukan di atas maka, dapat dilihat bahwa sudut *bending* maksimum yang dapat dicapai menggunakan metode *laser beam bending* bila dilakukan tanpa adanya beban struktural dari luar adalah sebesar $0,01221^\circ$ serta terjadi pada variasi *laser power* sebesar 1500 W dengan *pass number* sebanyak 3 *pass*. Hal ini menjelaskan bahwa ketika ingin menambah kemampuan sudut *bending* pada *laser beam bending* dapat dilakukan dengan cara menambah jumlah *laser power* dari metode tersebut. Adapun nilai selisih sudut *bending* pada 3 *pass* untuk setiap *laser power* adalah $0,002407^\circ$ untuk *laser power* antara 1200 W dengan 900 W serta $0,002465^\circ$ untuk *laser power* antara 1500 W dengan 1200 W.

Sedangkan, nilai hasil *springback* mencapai angka terbesar untuk metode *laser beam bending* adalah pada saat *laser power* 1500 W 3 *pass* sebesar $0,006363^\circ$. Adapun nilai selisih *springbak* pada 3 *pass* untuk setiap *laser power* adalah $0,001239^\circ$ untuk *laser power* antara 1200 W dengan 900 W serta $0,001295^\circ$ untuk *laser power* antara 1500 W dengan 1200 W. Hal ini menunjukkan, semakin tinggi input dari *laser power* maka akan semakin tinggi pula sudut *bending* serta *springback* yang dapat dicapai pada metode *laser beam bending* ini.

Namun, anomali terjadi pada saat variasi *laser* 4 *pass* dilakukan di mana *springback* yang muncul tidaklah menuju ke arah negatif *bending* namun, menuju ke arah positif dari sudut *bending* awal yang dicapai. Anomali ini pun terjadi pada saat kondisi penghilangan beban termal terjadi atau pada saat *cooling condition*. Adapun perbandingan hasil sudut *bending* dan *springback* berdasarkan tiap *power laser* dan *pass number* dijelaskan pada Gambar 4.34 dan Gambar 4.35 berikut.



Gambar 4.34 Grafik Perbandingan Hasil Sudut *Bending* untuk Setiap *Laser Power* dan *Pass Number*



Gambar 4.35 Grafik Perbandingan Hasil *Springback* untuk Setiap *Laser Power* dan *Pass Number*

4.2.2. Perbandingan Hasil *Laser Beam Bending* dengan *Rotary Draw Bending*

Perbedaan yang muncul dari hasil penelitian ini terhadap kedua metode diantaranya adalah kemampuan sudut *bending*, radius *bending*, profil *bending*, *springback* yang dihasilkan, serta perubahan energi yang terjadi. Telah ditunjukkan pada analisa data di atas bahwa metode *rotary draw bending* memiliki kemampuan sudut *bending* yang lebih besar dan baik bila dibandingkan dengan metode *laser beam bending*. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 4.1 yang merupakan perbandingan kemampuan sudut *bending* untuk metode *laser beam bending* dan *rotary draw bending*. Perbandingan yang digunakan untuk metode *laser beam bending* hanya pada kemampuan sudut maksimum berdasarkan penelitian ini yaitu proses *bending* pada 3 *pass* untuk setiap *laser power*.

Tabel 4.1 Perbandingan Kemampuan Sudut *Bending* Penelitian pada Metode *Laser Beam Bending* dan *Rotary Draw Bending*

<i>Laser Beam Bending</i>			<i>Rotary Draw Bending</i>
900 W	1200 W	1500 W	
0,1221°	0,009745°	0,007338°	180°

Begitupun dengan radius *bending* yang dapat dicapai oleh metode *laser beam bending* yang memiliki keterbatasan bila dibandingkan dengan metode *rotary draw bending*. Profil *bending* pada metode *rotary draw bending* pun terlihat lebih halus bila dibandingkan dengan metode *laser beam bending*. Namun, *springback* yang dihasilkan oleh metode *laser beam bending* sangat jauh lebih kecil dibandingkan dengan metode *rotary draw bending*. Hal ini lah yang menjadi kelebihan dari metode *laser beam bending* sehingga kedepannya metode ini sangat banyak mengalami pengembangan seperti penggunaan *die* dan *external force* untuk menanggulangi kekurangan-kekurangan yang telah dijelaskan.

Adapun perbandingan *springback* yang muncul pada kedua metode akan dijelaskan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan Hasil *Springback* Penelitian pada Metode *Laser Beam Bending* dan *Rotary Draw Bending*

<i>Laser Beam Bending</i>				<i>Rotary Draw Bending</i>		
	900 W	1200 W	1500 W	60°	120°	180°
2 pass	$1,34 \times 10^{-4}$	$1,78 \times 10^{-4}$	$2,24 \times 10^{-4}$	1,54°	2,469°	3,11°
3 pass	$3,83 \times 10^{-3}$	$5,07 \times 10^{-3}$	$6,36 \times 10^{-3}$			
4 pass	$-9,8 \times 10^{-4}$	$-1,26 \times 10^{-3}$	$-1,54 \times 10^{-3}$			

Adapun perubahan energi yang terjadi pada saat *loading* maupun *unloading* untuk kedua metode mengalami perbedaan. Perbedaan pertama yaitu berupa besarnya energi yang muncul. Pada metode *laser beam bending* dapat terlihat energi terbesar yang muncul hanya mencapai angka 0,4366 MPa. angka ini sangatlah kecil bila dibandingkan dengan metode *rotary draw bending* yang mampu menghasilkan energi maksimum hingga mencapai 397 MPa. Hal ini membuktikan bahwa metode *laser beam bending* memiliki efisiensi penghematan energi yang lebih baik untuk dapat digunakan kedepannya. Perbedaan kedua yaitu mengenai energi yang muncul pada saat *unloading*. Seperti yang diketahui bersama bahwa *springback* merupakan suatu kejadian yang mengindikasikan *stress relief* yang muncul pada saat *unloading* dari proses *bending*. Teori ini terbukti pada metode *rotary draw bending* sebagai mana terlihat di atas. Namun, hal ini tidaklah terjadi pada metode *laser beam bending*. Pada metode *laser beam bending*, *springback* yang terjadi malah menghasilkan penambahan energi yang muncul pada daerah *bending* dari *tube*, terutama pada daerah *buckling* dari *tube* itu sendiri setelah *unloading*. Hal ini dapat terjadi dikarenakan *springback* yang muncul pada metode *laser beam bending* didasari oleh mekanisme pemuatan dan penyusutan secara pengamatan macro di mana, apabila diamati secara micro maka mekanisme ini

disebabkan oleh perubahan fasa yang terjadi selama pemanasan dan pendinginan. Perubahan fasa yang terjadi juga menyebabkan perubahan bentuk dan struktur kristal penyusunnya sehingga menimbulkan perubahan dislokasi. Perubahan dislokasi ini lah yang akhirnya menciptakan *residual stress* terpusat yang memunculkan indikasi peningkatan energi pada *springback* dan bukan memunculkan *stress relief*. Berikut adalah Tabel 4.3 dan Tabel 4.4 mengenai perbandingan energi yang muncul pada saat kondisi *loading* dan *unloading*.

Tabel 4.3 Perbandingan Energi pada Kondisi *Loading*

<i>Laser Beam Bending</i>			
	900 W	1200 W	1500 W
<i>2 pass</i>	24820,4 Pa	33093,8 Pa	41367,3 Pa
<i>3 pass</i>	247776 Pa	330368 Pa	412960 Pa
<i>4 pass</i>	260680 Pa	347574 Pa	434467 Pa
<i>Rotary Draw Bending</i>			
	60°	120°	180°
	395x10 ⁶ Pa	395x10 ⁶ Pa	397x10 ⁶ Pa

Tabel 4.4 Perbandingan Energi pada Kondisi *Unloading*

<i>Laser Beam Bending</i>			
	900 W	1200 W	1500 W
<i>2 pass</i>	25393,2 Pa	33857,6 Pa	42322 Pa
<i>3 pass</i>	253926 Pa	338568 Pa	423210 Pa
<i>4 pass</i>	261932 Pa	349243 Pa	436554 Pa
<i>Rotary Draw Bending</i>			
	60°	120°	180°
	209x10 ⁶ Pa	208x10 ⁶ Pa	206x10 ⁶ Pa

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik kesimpulan penelitian:

- i. Semakin besar *laser power* yang diberikan pada metode *laser beam bending* maka semakin tinggi pula *springback* yang dihasilkan untuk *tube* berpenampang lingkaran dengan OD 15 mm dan tebal 2 mm material SS304L.
- ii. Semakin banyak *pass number* yang diberikan pada metode *laser beam bending* maka semakin tinggi pula *springback* yang dihasilkan untuk *tube* berpenampang lingkaran dengan OD 15 mm dan tebal 2 mm material SS304L.
- iii. *Springback* yang dihasilkan oleh proses *bending* untuk *tube* berpenampang lingkaran dengan OD 15 mm dan tebal 2 mm material SS304L menggunakan metode *laser beam bending* lebih kecil bila dibandingkan dengan proses *bending* bila dilakukan menggunakan metode *rotary draw bending*.

5.2. Saran

Saran yang dapat digunakan untuk penelitian berikutnya adalah:

- i. Melakukan eksperimen prorses dari metode *laser beam bending* dan *rotary draw bending* pada *tube* agar hasil dari simulasi dapat divalidasikan.
- ii. Membuat simulasi lainnya pada metode *laser beam bending* dengan menggunakan *die* dan *external force* untuk melihat variasi hasil lainnya.
- iii. Membuat simulasi lainnya pada metode *rotary draw bending* dengan menggunakan mandrel untuk melihat variasi hasil lainnya

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

DAFTAR PUSTAKA

- Akinlabi, Esther T. et al. (2012). *Laser Forming of Titanium and Its Alloys-An Overview*.
- Dahotre, Narendra B. dan Harimkar, Sandip P. (2007). *Laser Fabrication and Machining of Materials*. New York: Springer.
- Gisario, A. et al. (2011). *Springback Control in Sheet Metal Bending by Laser-Assisted Bending: Experimental Analysis, Empirical and Neural Network Modelling*. Roma: 'La Sapienza' Università degli Studi di Roma.
- _____. (2016). *Improvement in Springback Control by External Force Laser-Assisted Sheet Bending of Titanium and Aluminium Alloys*. Roma: Sapienza Università di Roma.
- Hao, N. dan Li, L. (2003). *An Analytical Model For Laser Tube Bending*. Manchester: University of Manchester Institute of Science and Technology.
- Jiang, Z.Q. et al. (2010). *Establishment of a 3D FE model for the bending of a titanium alloy tube*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.
- Kim, J. et al. (2006). *Effect of Hardening Laws and Yield Function Types on Spring-Back Simulations of Dual-Phase Steel Automotive Sheets*. Seoul: Seoul National University.
- Sumikawa, S. et al. (2017). *Improvement of Springback Prediction Accuracy by Considering Nonlinear Elastoplastic Behavior After Stress Reversal*. Kawasaki: JFE Steel Corporation.
- Thorat, Sandeep. (2015). *Finite Element Analysis and Mathematical Calculation of Springback in Rotary Draw Tube Bending*. Pune: MIT College of Engineering.
- Xue, X. et al. (2014). *Twist Springback of Asymmetric Thin-walled Tube in Mandrel Rotary Draw Bending Process*. Nagoya: Japan.
- Yang, H., H. Li, dan M. Zhan. (2010). *Friction Role in Bending Behaviors of Thin-Walled Tube in Rotary-Draw-Bending*

- Under Small Bending Radii*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.
- _____. (2012). *Springback Characterization and Behaviors of High-Strength Ti-3Al-2.5V Tube in Cold Rotary Draw Bending*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.
- Yao, Y. Lawrance dan Li, Wenchuan. (2001). *Laser Bending of Tubes: Mechanism, Analysis, and Prediction*. New York: Columbia University.
- Zhao, et al. (2009). *Three-dimensional finite-elements modeling and simulation of rotary-draw bending process for thin-walled rectangular tube*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.
- Zhu, X.Y. et al. (2012). *Development and Application of The Material Constitutive Model in Springback Prediction of Cold-Bending*. Xi'an: Northwestern Polytechnical University.

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Adnan Syadidan dilahirkan di Balikpapan, 2 Mei 1994, merupakan anak ketiga dari tiga bersaudara dan telah menempuh pendidikan formal di SD YPVDP Bontang, kemudian melanjutkan studi di SMP YPVDP Bontang dan SMA Vidatra Bontang. Setelah lulus dari SMA tahun 2012, Penulis diterima menjadi mahasiswa di Jurusan Teknik Material dan Metalurgi Institut Teknologi Sepuluh Nopember dengan nomor registrasi pokok 2712 100 091.

Semasa kuliah penulis aktif berorganisasi menjadi staf Badan Semi Otonom Kewirausahaan HMMT FTI ITS. Penulis juga aktif terlibat dalam kepanitian acara kongres Ikatan Alumni Material ITS. Penulis melaksanakan kerja praktik di PT VICO INDONESIA.

LAMPIRAN

1. Pembuatan Geometri *Laser Beam Bending* Dalam Software

```
/NOPR
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,LSDYNA,0
KEYW,PR_DYNA,0
/GO
!*
/COM,
/COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
/COM, Structural
!*
/PREP7
!*
ET,1,SHELL281
!*
!*
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,EX,1,,110E9
MPDATA,PRXY,1,,
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDE,EX,1
```

MPDE,PRXY,1
MPDATA,EX,1,,1.1E+011
MPDATA,PRXY,1,,0.3
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
MPDATA,DENS,1,,7850
MPTEMP,,,,,,,,
MPTEMP,1,0
UIMP,1,REFT,,,
MPDATA,ALPX,1,,2E-5
K,1,50,6,0,
K,11,50,12,0,
K,12,50,6,6,
K,13,50,0,0,
K,14,50,6,-6,
K,2,350,6,0,
K,21,350,12,0,
K,22,350,6,6,
K,23,350,0,0,
K,24,350,6,-6,
K,3,650,6,0,
K,31,650,12,0,
K,32,650,6,6,
K,33,650,0,0,
K,34,650,6,-6,
!*
LARC,11,14,1,6,
!*
LARC,14,13,1,6,
!*
LARC,13,12,1,6,
!*
LARC,12,11,1,6,
!*
LARC,21,24,2,6,

!*
LARC,24,23,2,6,
!*
LARC,23,22,2,6,
!*
LARC,22,21,2,6,
!*
LARC,31,34,3,6,
!*
LARC,34,33,3,6,
!*
LARC,33,32,3,6,
!*
LARC,32,31,3,6,
!*
LARC,11,14,1,6,
!*
LARC,14,13,1,6,
!*
LARC,13,12,1,6,
!*
LARC,12,11,1,6,
!*
LARC,21,24,2,6,
!*
LARC,24,23,2,6,
!*
LARC,23,22,2,6,
!*
LARC,22,21,2,6,
!*
LARC,31,34,3,6,
!*
LARC,34,33,3,6,
!*

```

LARC,33,32,3,6,
!*
LARC,32,31,3,6,
/USER, 1
/VIEW, 1, 0.947796403834 , 0.106875785903 ,
0.300432260695
/ANG, 1, 1.50983294272
/REPLO
/VIEW, 1, 0.975838170480 , 0.201803448851 ,
0.837569881584E-01
/ANG, 1, 3.17473404270
/REPLO
LPLOT
LSTR, 11, 21
LSTR, 21, 31
LSTR, 14, 24
LSTR, 24, 34
LSTR, 13, 1
LSTR, 13, 23
LSTR, 23, 33
LSTR, 12, 22
LSTR, 22, 32
/DIST,1,0.729,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.729,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.729,1
/REP,FAST
/DIST,1,0.729,1
/REP,FAST
LDELE, 17
FLST,2,4,4
FITEM,2,1
FITEM,2,5
FITEM,2,13

```

FITEM,2,15
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,2
FITEM,2,6
FITEM,2,18
FITEM,2,15
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,7
FITEM,2,3
FITEM,2,18
FITEM,2,20
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,4
FITEM,2,8
FITEM,2,13
FITEM,2,20
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,5
FITEM,2,9
FITEM,2,16
FITEM,2,14
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,6
FITEM,2,10
FITEM,2,19
FITEM,2,16
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,11
FITEM,2,7

FITEM,2,19
FITEM,2,21
AL,P51X
FLST,2,4,4
FITEM,2,8
FITEM,2,14
FITEM,2,12
FITEM,2,21
AL,P51X
sect,1,shell,,
secdata, 2,1,0.0,3
secoffset,BOT
seccontrol,,,, , , ,
SMRT,6
SMRT,1
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,0
!*
FLST,5,8,5,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-8
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
AMESH,_Y1
!*
CMDELE,_Y
CMDELE,_Y1
CMDELE,_Y2
!*
SAVE
FINISH

2. Pembuatan Geometri *Rotary Draw Bending* Dalam *Software*

```
/NOPR
/PMETH,OFF,0
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,1
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_MULT,0
KEYW,LS DYNA,0
/GO

/PREP7
ET,1,SHELL281
KEYOPT,1,8,2

R,1,0.002,0.002,0.002,0.002, , !pipe thickness t=2 mm

MP,EX,1,196E9 !modulusyoung
MP,PRXY,1,0.3 !poissonratio
MP,DENS,1,7850 !density

TB,BISO,1,1,2,
TBTEMP,0
TBDATA,,210E6,149.36E7,,

!bend die and clamp
k,1,0,0,0
k,2,0,-0.12,0
k,3,0,-0.14,0.02
k,4,0,-0.14,-0.02

k,5,0.12,0,0
k,6,0.14,0,0.02
```

k,7,0.14,0,-0.02

k,8,0,0.12,0

k,9,0,0.14,0.02

k,10,0,0.14,-0.02

k,11,-0.1,0.12,0

k,12,-0.1,0.14,0.02

k,13,-0.1,0.14,-0.02

k,14,-0.1,0.16,0

k,15,0,0.16,0

k,16,-0.1,0.14,0

k,17,0,0.14,0

k,18,0.14,0,0

k,19,0,-0.14,0

k,20,0,0,0.02

k,21,0,0,-0.02

larc,11,12,16,0.02 !1

larc,12,14,16,0.02 !2

larc,14,13,16,0.02 !3

larc,13,11,16,0.02 !4

larc,8,9,17,0.02 !5

larc,9,15,17,0.02 !6

larc,15,10,17,0.02 !7

larc,10,8,17,0.02 !8

larc,6,5,18,0.02 !9

larc,5,7,18,0.02 !10

larc,3,2,19,0.02 !11

larc,2,4,19,0.02 !12

!clamp 1

FLST,2,4,4,ORDE,2

FITEM,2,1

FITEM,2,-4

LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1

FLST,3,4,4,ORDE,2

FITEM,3,1

FITEM,3,-4

LGEN, ,P51X, , , ,0.07, , , ,1

!clamp 2

FLST,2,4,4,ORDE,2

FITEM,2,5

FITEM,2,-8

LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1

FLST,3,4,4,ORDE,2

FITEM,3,5

FITEM,3,-8

LGEN, ,P51X, , , ,0.07, , , ,1

!bend die

FLST,2,2,4,ORDE,2

FITEM,2,9

FITEM,2,-10

LSSCALE,P51X, , ,0.5,1,1, ,1,1

FLST,3,2,4,ORDE,2

FITEM,3,9

FITEM,3,-10

LGEN, ,P51X, , ,0.07, , , , ,1

!bend die

FLST,2,2,4,ORDE,2

FITEM,2,11
 FITEM,2,-12
 LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1
 FLST,3,2,4,ORDE,2
 FITEM,3,11
 FITEM,3,-12
 LGEN, ,P51X, , , ,-0.07, , , ,1

larc,9,6,20,0.14 !13
 larc,6,3,20,0.14 !14
 larc,10,7,21,0.14 !15
 larc,7,4,21,0.14 !16
 larc,8,5,1,0.13 !17
 larc,5,2,1,0.13 !18

GPLOT

1,12,9 !L19
 1,8,11 !20
 1,10,13 !21
 1,14,15 !22

al,1,19,20,5
 al,19,2,22,6
 al,22,3,21,7
 al,20,8,21,4
 al,5,17,9,13
 al,8,15,10,17
 al,9,18,11,14
 al,10,16,12,18

k,22,0,0.12,0
 k,23,0,0.14,0.02

k,24,0,0.14,-0.02

k,25,0,0.14,0

k,26,0.2,0.12,0

k,27,0.2,0.14,0.02

k,28,0.2,0.14,-0.02

k,29,0.2,0.14,0

k,30,0,0.16,0

k,31,0.3,0.14,0.02

k,32,0.3,0.14,-0.02

k,33,0.3,0.16,0

k,34,0.3,0.14,0

k,35,0,0.14,0.02

k,36,0,0.14,-0.02

k,37,0,0.14,0

larc,22,23,25,0.02 !23

larc,22,24,25,0.02 !24

larc,27,26,29,0.02 !25

larc,26,28,29,0.02 !26

FLST,2,2,4,ORDE,2

FITEM,2,23

FITEM,2,-24

LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1

FLST,3,2,4,ORDE,2

FITEM,3,23

FITEM,3,-24

LGEN, ,P51X, , , ,0.07, , , ,1

FLST,2,2,4,ORDE,2

FITEM,2,25

FITEM,2,-26
LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1
FLST,3,2,4,ORDE,2
FITEM,3,25
FITEM,3,-26
LGEN, ,P51X, , , ,0.07, , , ,1

1,23,27 !27
1,22,26 !28
1,24,28 !29

al,27,23,28,25
al,24,29,26,28

larc,35,30,37,0.02 !30
larc,30,36,37,0.02 !31
larc,31,33,34,0.02 !32
larc,33,32,34,0.02 !33

FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,30
FITEM,2,-31
LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1
FLST,2,2,4,ORDE,2
FITEM,2,32
FITEM,2,-33
LSSCALE,P51X, , ,1,0.5,1, ,1,1
FLST,3,2,4,ORDE,2
FITEM,3,30
FITEM,3,-31
LGEN, ,P51X, , , ,0.07, , , ,1
FLST,3,2,4,ORDE,2
FITEM,3,32
FITEM,3,-33
LGEN, ,P51X, , , ,0.07, , , ,1

l,35,31	!34
l,30,33	!35
l,36,32	!36

al,30,34,32,35
al,33,36,31,35

k,38,-0.15,0.1215,0
k,39,-0.15,0.14,0.0185
k,40,-0.15,0.14,-0.0185
k,41,-0.15,0.1585,0
k,42,-0.15,0.14,0

k,43,0.65,0.1215,0
k,44,0.65,0.14,0.0185
k,45,0.65,0.14,-0.0185
k,46,0.65,0.1585,0
k,47,0.65,0.14,0

larc,38,40,42,0.0185	!37
larc,40,41,42,0.0185	!38
larc,41,39,42,0.0185	!39
larc,39,38,42,0.0185	!40

larc,43,45,47,0.0185	!41
larc,45,46,47,0.0185	!42
larc,46,44,47,0.0185	!43
larc,44,43,47,0.0185	!44

FLST,2,4,4,ORDE,2
FITEM,2,37
FITEM,2,-40
LSSCALE,P51X, , ,1,0.45,1, ,1,1
FLST,2,4,4,ORDE,2

FITEM,2,41
 FITEM,2,-44
 LSSCALE,P51X, , ,1,0.45,1, ,1,1
 FLST,3,4,4,ORDE,2
 FITEM,3,37
 FITEM,3,-40
 LGEN, ,P51X, , , ,0.077, , , ,1
 FLST,3,4,4,ORDE,2
 FITEM,3,41
 FITEM,3,-44
 LGEN, ,P51X, , , ,0.077, , , ,1

1,40,45	!45
1,38,43	!46
1,39,44	!47
1,41,46	!48

al,43,47,48,39
 al,38,48,42,45
 al,41,45,37,46
 al,44,46,40,47

ASEL,S,,,13,16,1,

TYPE, 1
 MAT, 1
 REAL, 1
 ESYS, 0
 SECNUM,
 SMRT,4
 MSHAPE,1,2D
 MSHKEY,0

AMESH,ALL

/psymb,esys,1

ASEL,s, , ,13,13,1,
ESLA,S
ENSYM, , , ,ALL,
normal
ALLSEL,ALL
APLOT

!reversing

ASEL,S, , ,15,16,1,
ESLA,S
ENSYM, , , ,ALL,
normal
ALLSEL,ALL
APLOT

!reversing

!*
!*
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,3,0.2
MAT,3
MP,EMIS,3,7.88860905221e-031
R,3
REAL,3
ET,2,170
ET,3,174
R,3,,,0.5,0.5,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5

RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,3,4,0
KEYOPT,3,5,1
KEYOPT,3,7,0
KEYOPT,3,8,0
KEYOPT,3,9,0
KEYOPT,3,10,2
KEYOPT,3,11,1
KEYOPT,3,12,0
KEYOPT,3,2,0
KEYOPT,2,1,0
KEYOPT,2,2,0
KEYOPT,2,3,0
KEYOPT,2,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,1
ASEL,A,,,2
ASEL,A,,,3
ASEL,A,,,4
ASEL,A,,,5
ASEL,A,,,6
ASEL,A,,,7
ASEL,A,,,8
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,3,2,-1
TYPE,2
AMESH,ALL
! Create a pilot node
N,15706, 0,0,0
TSHAP,PILO
E,15706
NSEL,S,,,15706
CM,a,NODE
CMSEL,S,_NODECM
! Generate the contact surface

```
ASEL,S,,,13
ASEL,A,,,14
ASEL,A,,,15
ASEL,A,,,16
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,3
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,3
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
! Reverse target normals
FLST,5,4,5,ORDE,4
FITEM,5,2
FITEM,5,-3
FITEM,5,7
FITEM,5,-8
CM,_Y,AREA
ASEL, , , ,P51X
CM,_YLN,LINE
CM,_YEL,ELEM
CM,_YND,NODE
LSLA,S,1
NSLA,S,1
ESLN,S,1
```

ESEL,R,REAL,,_REALID
ESURF,,REVERSE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_YLN
CMSEL,S,_YEL
CMSEL,S,_YND
CMDELE,_Y
CMDELE,_YLN
CMDELE,_YEL
CMDELE,_YND
/REPLOT
!*
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,2
ESEL,A,TYPE,,3
ESEL,R,REAL,,3
ASEL,S,REAL,,3
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM

```
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
!*
!*
CM,_NODECM,NODE
CM,_ELEMCM,ELEM
CM,_KPCM,KP
CM,_LINECM,LINE
CM,_AREACM,AREA
CM,_VOLUCM,VOLU
/GSAV,cwz,gsav,,temp
MP,MU,4,0.1
MAT,4
MP,EMIS,4,7.88860905221e-031
R,4
REAL,4
ET,4,170
ET,5,174
R,4,,,0.5,0.5,0,
RMORE,,,1.0E20,0.0,1.0,
RMORE,0.0,0,1.0,,1.0,0.5
RMORE,0,1.0,1.0,0.0,,1.0
KEYOPT,5,4,0
KEYOPT,5,5,1
KEYOPT,5,7,0
KEYOPT,5,8,0
KEYOPT,5,9,0
KEYOPT,5,10,2
KEYOPT,5,11,1
KEYOPT,5,12,0
KEYOPT,5,2,0
```

```
KEYOPT,4,1,0
KEYOPT,4,2,0
KEYOPT,4,3,0
KEYOPT,4,5,0
! Generate the target surface
ASEL,S,,,9
ASEL,A,,,10
ASEL,A,,,11
ASEL,A,,,12
CM,_TARGET,AREA
AATT,-1,4,4,-1
TYPE,4
AMESH,ALL
! Generate the contact surface
ASEL,S,,,13
ASEL,A,,,14
ASEL,A,,,15
ASEL,A,,,16
CM,_CONTACT,AREA
TYPE,5
NSLA,S,1
ESLN,S,0
NSLE,A,CT2 ! CZMESH patch (fsk qt-40109 8/2008)
ESURF
*SET,_REALID,4
ALLSEL
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPL0T
```

```
! Reverse target normals
FLST,5,2,5,ORDE,2
FITEM,5,10
FITEM,5,12
CM,_Y,AREA
ASEL,, , ,P51X
CM,_YLN,LINE
CM,_YEL,ELEM
CM,_YND,NODE
LSLA,S,1
NSLA,S,1
ESLN,S,1
ESEL,R,REAL,,_REALID
ESURF,,REVERSE
CMSEL,S,_Y
CMSEL,S,_YLN
CMSEL,S,_YEL
CMSEL,S,_YND
CMDELE,_Y
CMDELE,_YLN
CMDELE,_YEL
CMDELE,_YND
/REPLOT
!*
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
/PSYMB,ESYS,1
/PNUM,TYPE,1
/NUM,1
EPLOT
ESEL,ALL
ESEL,S,TYPE,,4
```


ESEL,A,TYPE,,5
ESEL,R,REAL,,4
ASEL,S,REAL,,4
CMSEL,A,_NODECM
CMDEL,_NODECM
CMSEL,A,_ELEMCM
CMDEL,_ELEMCM
CMSEL,S,_KPCM
CMDEL,_KPCM
CMSEL,S,_LINECM
CMDEL,_LINECM
CMSEL,S,_AREACM
CMDEL,_AREACM
CMSEL,S,_VOLUCM
CMDEL,_VOLUCM
/GRES,cwz,gsav
CMDEL,_TARGET
CMDEL,_CONTACT
!*
CM,_CWZ_EL,ELEM
CM,_CWZ_ND,NODE
CM,_CWZ_KP,KP
CM,_CWZ_LN,LINE
CM,_CWZ_AR,AREA
CM,_CWZ_VL,VOLU
ESEL,NONE
ESEL,A,REAL,,3
ESEL,R,ENAME,,169,177
NSLE
KSLN,S
LSLK,S,1
ASLL,S,1
CM,_CWZ_EL_UE,ELEM
NSLE
ESLN

ESEL,U,ENAME,,169,177
CMSEL,A,_CWZ_EL_UE
!CNCHECK
CMDEL,_CWZ_EL_UE
CMSEL,S,_CWZ_EL
CMDEL,_CWZ_EL
CMSEL,S,_CWZ_ND
CMDEL,_CWZ_ND
CMSEL,S,_CWZ_KP
CMDEL,_CWZ_KP
CMSEL,S,_CWZ_LN
CMDEL,_CWZ_LN
CMSEL,S,_CWZ_AR
CMDEL,_CWZ_AR
CMSEL,S,_CWZ_VL
CMDEL,_CWZ_VL
!*
ENORM, 25669
!*
CM,_CWZ_EL,ELEM
CM,_CWZ_ND,NODE
CM,_CWZ_KP,KP
CM,_CWZ_LN,LINE
CM,_CWZ_AR,AREA
CM,_CWZ_VL,VOLU
ESEL,NONE
ESEL,A,REAL,,3
ESEL,R,ENAME,,169,177
NSLE
KSLN,S
LSLK,S,1
ASLL,S,1
CM,_CWZ_EL_UE,ELEM
NSLE
ESLN

ESEL,U,ENAME,,169,177
CMSEL,A,_CWZ_EL_UE
!CNCHECK
CMDEL,_CWZ_EL_UE
CMSEL,S,_CWZ_EL
CMDEL,_CWZ_EL
CMSEL,S,_CWZ_ND
CMDEL,_CWZ_ND
CMSEL,S,_CWZ_KP
CMDEL,_CWZ_KP
CMSEL,S,_CWZ_LN
CMDEL,_CWZ_LN
CMSEL,S,_CWZ_AR
CMDEL,_CWZ_AR
CMSEL,S,_CWZ_VL
CMDEL,_CWZ_VL
!*
!*
CM,_CWZ_EL,ELEM
CM,_CWZ_ND,NODE
CM,_CWZ_KP,KP
CM,_CWZ_LN,LINE
CM,_CWZ_AR,AREA
CM,_CWZ_VL,VOLU
ESEL,NONE
ESEL,A,REAL,,4
ESEL,R,ENAME,,169,177
NSLE
KSLN,S
LSLK,S,1
ASLL,S,1
CM,_CWZ_EL_UE,ELEM
NSLE
ESLN
ESEL,U,ENAME,,169,177

CMSEL,A,_CWZ_EL_UE
!CNCHECK

CMDEL,_CWZ_EL_UE
CMSEL,S,_CWZ_EL
CMDEL,_CWZ_EL
CMSEL,S,_CWZ_ND
CMDEL,_CWZ_ND
CMSEL,S,_CWZ_KP
CMDEL,_CWZ_KP
CMSEL,S,_CWZ_LN
CMDEL,_CWZ_LN
CMSEL,S,_CWZ_AR
CMDEL,_CWZ_AR
CMSEL,S,_CWZ_VL
CMDEL,_CWZ_VL

/SOL
ANTYPE,0
NLGEOM,1
NSUBST,100,1000,100
OUTRES,ERASE
OUTRES,ALL,ALL
TIME,100
FLST,2,1,1,ORDE,1
FITEM,2,15706
!*
/GO
D,P51X, ,0.524, , , ,ROTZ, , , , ,

!/STATUS,SOLU
SOLVE